

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
DEPARTAMENTO DE CIENCIA E INGENIERÍA DEL
TERRENO Y DE LOS MATERIALES

TESIS DOCTORAL
COMPORTAMIENTO EN FATIGA DE POLIAMIDAS
REFORZADAS CON FIBRA DE VIDRIO CORTA

Autor:

JOSÉ ANTONIO CASADO DEL PRADO

Directores:

D. FEDERICO GUTIÉRREZ-SOLANA SALCEDO

D. JUAN ANTONIO POLANCO MADRAZO

Tesis Doctoral presentada en la Universidad de Cantabria para la
obtención del título de Doctor en Ciencias Físicas

Santander, abril 2001

CAPÍTULO 4

CARACTERIZACIÓN EN FATIGA

1 INTRODUCCIÓN

Ya se apuntó en esta Tesis, con anterioridad, que la respuesta resistente del material constituyente de las piezas aislantes de las sujeciones de vía de ferrocarril se establece, en gran medida, sobre los procesos mecánicos dinámicos de fatiga producidos por la circulación de los trenes que transitan por la línea. Estas sollicitaciones dinámicas deterioran progresivamente las piezas y, consecuentemente, se genera una pérdida de capacidad para sujetar la vía, estableciéndose una situación de baja seguridad y de aumento de riesgo para los trenes en circulación. Por lo tanto, debe conocerse, con la mayor precisión posible, el comportamiento de los materiales de las piezas de sujeción ante los procesos de fatiga a los que se encuentran sometidas.

Además, la realidad del tráfico ferroviario impone, por motivos de seguridad, pasos de trenes discontinuos, estableciendo tiempos de espera entre pasos consecutivos de vehículos por la misma línea. Estos tiempos de descanso entre trenes de ondas consecutivos se consideran como intervalos de interrupción de las sollicitaciones mecánicas generadas por los vehículos en la línea ferrea y permiten la disipación del calor interno generado en el material compuesto de matriz termoplástica de las piezas aislantes de la sujeción de la vía. El material polimérico, una vez enfriado, es capaz de recuperar parte de su rigidez inicial y restablecer sus propiedades mecánicas, prolongándose de este modo su vida útil en fatiga [21].

En consecuencia, en este capítulo se va a caracterizar el comportamiento de los materiales de naturaleza polimérica, con que se confeccionan las piezas aislantes de sujeción, cuando son sollicitados por procesos dinámicos de fatiga, ya sean continuados o interrumpidos en el tiempo a diferentes intervalos.

2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 Material ensayado

En este apartado se estudia el comportamiento frente a la fatiga en tracción de 4 materiales utilizados habitualmente en la inyección de las piezas aislantes. Se analizará el comportamiento de dos familias de polímeros termoplásticos: PA reforzada, con distinto porcentaje en peso de fibra corta de vidrio, y resina acetálica sin reforzar, dada su incompatibilidad química con el refuerzo inorgánico. Los materiales a caracterizar, con su correspondiente código alfanumérico de identificación, se indican a continuación:

- PA 6 reforzada con un 25 y 35% (PS25 y PS35)
- PA 6.6 reforzada en un 35% (PR35)

- Resina acetálica (R)

De esta manera se puede determinar la influencia en el comportamiento en fatiga del tipo de material: PA reforzada o resina acetálica; del tipo de matriz de PA: 6 ó 6.6 y de la cantidad de refuerzo presente: 25 y 35% en peso.

2.2 Técnicas experimentales

Para realizar los ensayos de fatiga se utilizó el mismo tipo de probetas de tracción normalizadas que las empleadas en la caracterización convencional previa, cuya geometría se muestra en la Figura 3.21. Las probetas fueron producidas mediante la técnica del moldeo por inyección de tal modo que, en las de PA reforzada, las fibras cortas de vidrio se orientan paralelamente al eje longitudinal de las mismas. El contenido de humedad de las probetas de PA reforzada fue del 2.5%.

Para cada material se consideró, como referencia de resistencia mecánica, su tensión de rotura (σ_R), obtenida en condiciones dinámicas aplicando un impacto de carga en tracción sobre las probetas, con la velocidad que proporciona la generación de un ciclo de onda cuadrada en control de posición. Esta velocidad es de 13500 mm/min, y se corresponde con la aplicada en los ensayos dinámicos de flexión en tres puntos realizados en la caracterización convencional previa de los materiales, y que fueron analizados en el Capítulo 3 de esta Tesis.

Los ensayos de fatiga continuada se realizaron en una máquina servohidráulica universal de ensayos mecánicos, marca INSTRON, modelo 8501, en control de carga, a la frecuencia de 5 Hz y a la temperatura ambiente del laboratorio. Los niveles de tensión aplicados están comprendidos entre un valor máximo ($\sigma_{\max}$), variable de uno a otro ensayo, y uno mínimo ($\sigma_{\min}$), fijado en $0.05\sigma_R$ para evitar compresiones y el posible pandeo de las probetas. El nivel tensional superior inicial fue de $0.90\sigma_R$. Los ensayos se ejecutaron hasta la rotura de cada probeta. El valor de $\sigma_{\max}$ se fue reduciendo de un ensayo a otro con intervalos de $0.10\sigma_R$ hasta que el material soporta 10^6 ciclos sin romper. La variación de tensión más alta que alcanzó dicha secuencia se denominó $\Delta\sigma_6$. En algún caso se procedió a realizar un ensayo adicional de $5 \cdot 10^6$ ciclos para contrastar el valor umbral de resistencia a la fatiga, $\Delta\sigma_6$, determinado bajo las condiciones anteriormente descritas. Los ensayos se realizaron con ondas de carga de función cuadrada, por un lado, y senoidal, por otro.

Para llevar a cabo la parte experimental del estudio de fatiga interrumpida se emplearon en la realización de los ensayos de fatiga principalmente dos regímenes de ondas de carga de función senoidal. Éstos se diferenciaron en el intervalo de tiempo de espera (t_e) o período de descanso aplicado entre dos trenes de onda consecutivos: 30 ó 180 segundos entre bloques de ondas de 300 ciclos. Ocasionalmente se aplicaron tiempos de espera superiores, de 300 y 900 segundos. En la Figura 4.1 se presenta un esquema de los patrones de esfuerzo aplicados en los ensayos de fatiga interrumpida realizados.

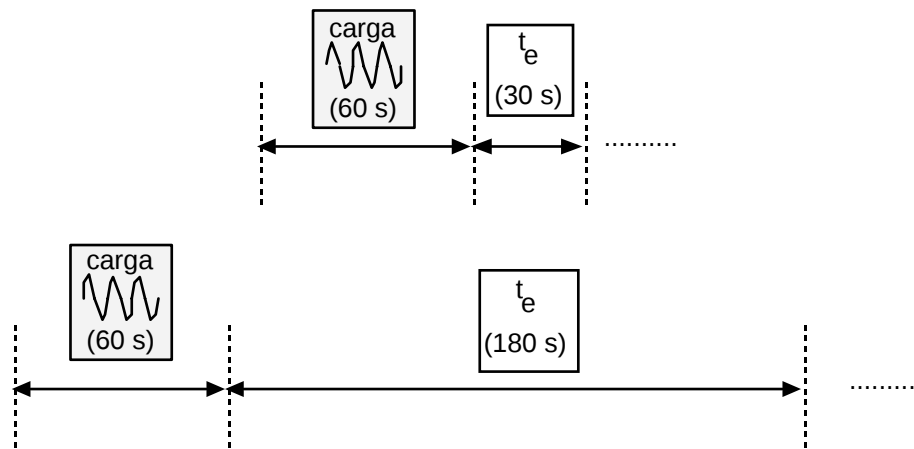


Figura 4.1. Principales patrones de carga empleados en fatiga interrumpida.

En la Fotografía 4.1 se puede apreciar el equipamiento empleado para la realización de los ensayos de fatiga anteriormente descritos.



Fotografía 4.1. *Equipamiento empleado en la realización de los ensayos.*

En la Fotografía 4.2 se puede observar un detalle del sistema empleado para determinar las deformaciones sufridas por la probeta y los correspondientes incrementos de temperatura experimentados por la misma.



Fotografía 4.2. *Detalle del equipamiento.*

Durante la ejecución de los ensayos de fatiga se registraron los parámetros que a continuación se relacionan:

- Variación de la carga aplicada en cada uno de los ensayos, empleando una célula de carga, marca INSTRON de 100 kN de capacidad total.
- Temperatura superficial de la probeta medida a través de una resistencia sensitiva ubicada en la zona calibrada de la probeta, utilizando un multímetro marca HEWLETT & PACKARD, modelo 3467A.

- Variación de la longitud total de la probeta, midiendo la separación entre las mordazas de la máquina de ensayos.

- Deformación longitudinal unitaria de la zona calibrada del fuste de la probeta, en el caso de la onda de carga senoidal. La medida fue realizada empleando un extensómetro dinámico resistivo marca INSTRON, modelo 2620-601, con una base nominal de medida de 12.5 mm y un recorrido de ± 5 mm.
- Número de ciclos aplicado sobre la probeta hasta su rotura.

Las anteriores medidas fueron captadas a través de una tarjeta de adquisición de datos que permitió registrar y almacenar los datos para representar una evolución continua de la temperatura y de la rigidez de la probeta en todo momento durante cada ensayo.

3 RESULTADOS

3.1 Determinación del esfuerzo dinámico de rotura

En los gráficos de las Figuras 4.2 a 4.5 se representa la tensión aplicada frente al desplazamiento del actuador de la máquina de ensayos, obtenido para cada uno de los materiales analizados.

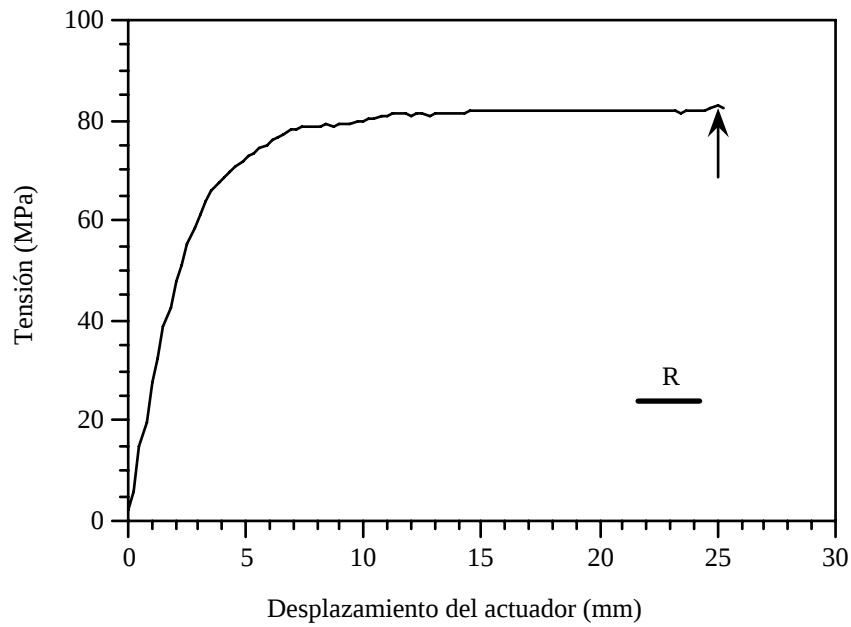


Figura 4.2. Determinación gráfica del esfuerzo dinámico de rotura (R).

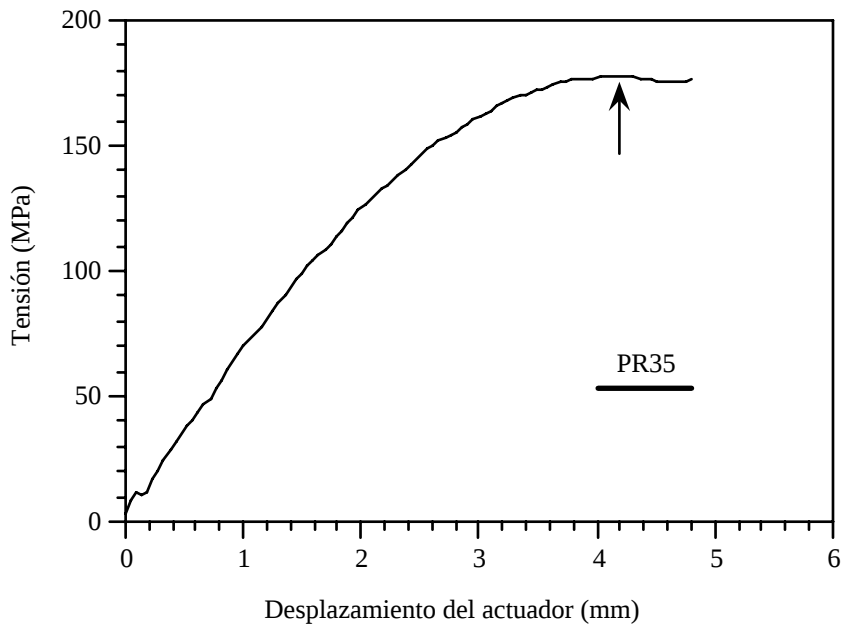


Figura 4.3. Determinación gráfica del esfuerzo dinámico de rotura (PR_{35}).

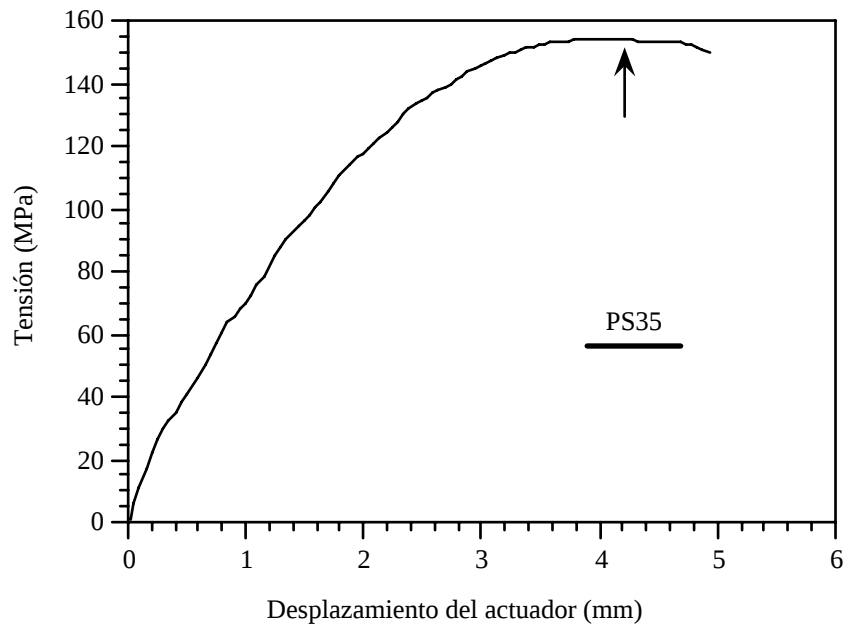


Figura 4.4. Determinación gráfica del esfuerzo dinámico de rotura (PS35).

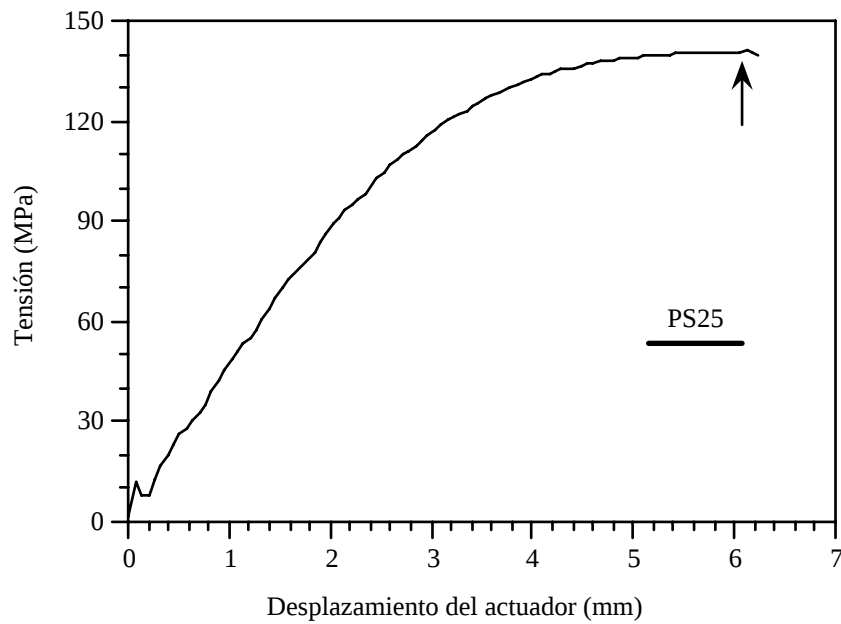


Figura 4.5. Determinación gráfica del esfuerzo dinámico de rotura (PS25).

En el gráfico de la Figura 4.6 se representa, conjuntamente para todos los materiales, la tensión aplicada frente al desplazamiento del actuador de la máquina de ensayos. En el mismo se puede apreciar que la diferencia de comportamiento entre los materiales se corresponde con el análisis realizado en el Capítulo 3.

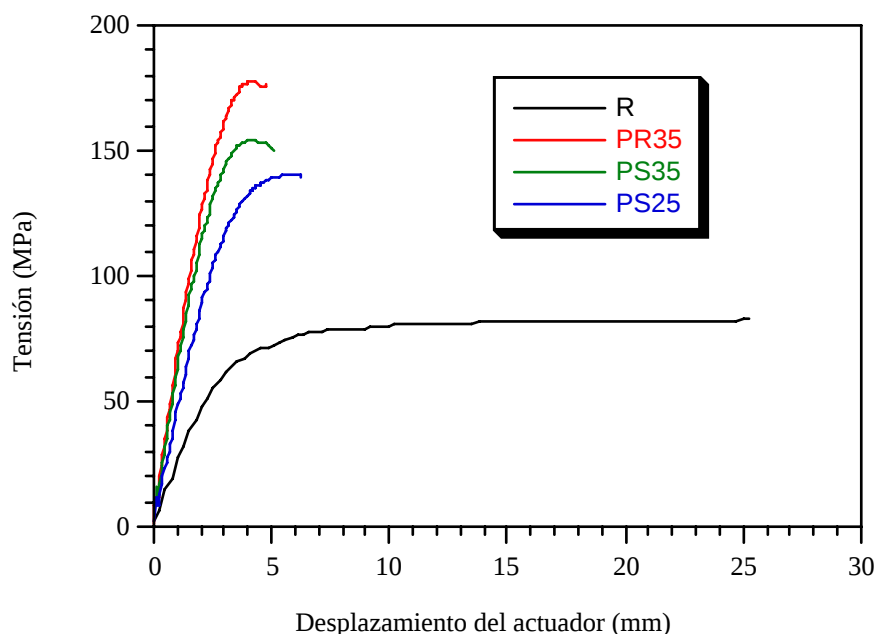


Figura 4.6. Comportamiento dinámico comparativo.

El esfuerzo de rotura dinámico puede ser obtenido de los gráficos a través de la lectura del valor de la carga máxima alcanzada previa a la rotura del material. La Tabla 4.1 presenta los valores de la tensión de rotura dinámica (σ_R) de todos los materiales en estudio, obtenidos como valor medio aritmético de 3 ensayos realizados sobre cada material. Los citados valores presentaron una gran uniformidad dentro de cada grupo de materiales.

Tabla 4.1. Valores medios del esfuerzo dinámico de rotura obtenidos

Material	R	PR35	PS35	PS25
σ_R (MPa)	81.0	166.8	151.0	140.6

3.2 Ensayos de fatiga

3.2.1 Curvas de Wöhler

En las Tablas 4.2 a 4.6 se presentan los resultados generales encontrados en los ensayos de fatiga, con onda senoidal y con onda cuadrada, realizados sobre los cuatro materiales en estudio. Para cada uno se indican los parámetros de ensayo empleados, como son: la variación porcentual de carga aplicada con respecto de los valores de rotura dinámica (ΔP_R), los valores de pico de carga y tensión aplicadas (máx-mín) y el número de ciclos soportado hasta la rotura de cada probeta o hasta el final del ensayo (N_R), como resultado de cada proceso experimental realizado.

Tabla 4.2. Resultados generales para R. (Sección recta = 44 mm²)

ΔP_R (%)	P (N) σ (MPa) máx-mín	Onda senoidal			Onda cuadrada		
		Probeta	N_R	Observ.	Probeta	N_R	Observ.
90-5	3204 - 178 72.82 - 4.04	R-173	300		R-27	926	
		R-174	394		R-28	740	
		R-175	242		R-29	691	
		R-176	245				
80-5	2850 - 178 64.80 - 4.04	R-177	428		R-30	3400	
		R-178	426		R-188	2800	
					R-187	2950	
70-5	2490 - 178 56.59 - 4.04	R-179	10 ⁶	Sin rotura	R-31	10 ⁶	Sin rotura
		R-180	1967		R-32	1.13 · 10 ⁶	Sin rotura
		R-181	1840				
60-5	2136 - 178 48.54 - 4.04	R-182	1.17 · 10 ⁶	Sin rotura			

Tabla 4.3. Resultados generales para PR35. (Sección recta = 39.40 mm²)

ΔP_R (%)	P (N) σ (MPa) máx-mín	Onda senoidal			Onda cuadrada		
		Probeta	N_R	Observ.	Probeta	N_R	Observ.
90-5	5913 - 328 150.08 - 8.32	PR35-192	30		PR35-20	4	
		PR35-193	30		PR35-21	4	
					PR35-22	5	
80-5	5260 - 328 133.50 - 8.32	PR35-49	103		PR35-23	34	
		PR35-67	108		PR35-24	30	
		PR35-197	93		PR35-25	31	
70-5	4600 - 328 116.75 - 8.32	PR35-198	258		PR35-26	163	
		PR35-199	303		PR35-52	176	
		PR35-200	277		PR35-53	178	

60-5	3942 - 328 100.05 - 8.32	PR35-15 837 PR35-16 851	PR35-54 300 PR35-55 567 PR35-56 550 PR35-57 531
50-5	3285 - 328 83.37 - 8.32	PR35-35 5510 PR35-45 7017 PR35-46 5945	PR35-58 20295 PR35-59 21331 PR35-60 8129 PR35-68 22700
40-5	2628 - 328 66.70 - 8.32	PR35-48 $1.23 \cdot 10^6$ Sin rotura	PR35-61 10^6 Sin rotura PR35-62 10^6 Sin rotura

Tabla 4.4. Resultados generales para PS35. (Sección recta = 40.40 mm²)

ΔP_R (%)	P (N) σ (MPa) máx-mín	Onda senoidal			Onda cuadrada		
		Probeta	N_R	Observ.	Probeta	N_R	Observ.
90-5	5454 - 303 135.00 - 7.50	PS35-23 PS35-24	49 38		PS35-4 PS35-5 PS35-6	3 3 2	
80-5	4850 - 303 120.05 - 7.50	PS35-25 PS35-26	96 89		PS35-7 PS35-8 PS35-9	11 14 15	
70-5	4240 - 303 104.95 - 7.50	PS35-27 PS35-28	215 213		PS35-10 PS35-11 PS35-12	88 68 92	
60-5	3636 - 303 90.00 - 7.50	PS35-29 PS35-30 PS35-31	456 534 539		PS35-13 PS35-14 PS35-15	384 371 310	
50-5	3030 - 303 75.00 - 7.50	PS35-32 PS35-33	2400 2265		PS35-16 PS35-17 PS35-18	2649 2519 2474	
40-5	2424 - 303 60.00 - 7.50	PS35-34 PS35-35	695253 531000		PS35-19 PS35-20	650000 713000	
30-5	1820 - 303 45.05 - 7.50	PS35-36 PS35-150	$1.14 \cdot 10^6$ $5 \cdot 10^6$	Sin rotura Sin rotura	PS35-21	10^6	Sin rotura

Tabla 4.5. Resultados generales para PS25. (Sección recta = 42.95 mm²)

ΔP_R (%)	P (N) σ (MPa) máx-mín	Onda senoidal			Onda cuadrada		
		Probeta	N_R	Observ.	Probeta	N_R	Observ.
90-5	5436 - 302 126.56 - 7.03	PS25-37	55		PS25-66	3	
		PS25-15	53		PS25-67	3	
					PS25-68	3	
80-5	4830 - 302 112.46 - 7.03	PS25-43	110		PS25-69	16	
		PS25-44	103		PS25-70	15	
					PS25-71	18	
70-5	4230 - 302 98.49 - 7.03	PS25-45	225		PS25-72	88	
		PS25-46	217		PS25-73	89	
					PS25-74	84	
60-5	3624 - 302 84.38 - 7.03	PS25-47	568		PS25-75	614	
		PS25-48	548		PS25-76	587	
					PS25-77	607	
50-5	3020 - 302 70.31 - 7.03	PS25-49	1981		PS25-78	6244	
		PS25-18	1792		PS25-79	9506	
					PS25-80	6806	
40-5	2416 - 302 56.25 - 7.03	PS25-19	96796		PS25-11	10 ⁶	Sin rotura
		PS25-26	94461		PS25-12	783000	
					PS25-13	10 ⁶	Sin rotura
30-5	1812 - 302 42.19 - 7.03	PS25-17	1.12 · 10 ⁶	Sin rotura			

Para representar gráficamente la variación de la tensión aplicada frente al número de ciclos de rotura de los materiales en estudio se empleó una función que describiese la forma de las curvas de Wöhler con la mejor fiabilidad posible. Esta función, necesariamente, debe presentar un comportamiento asintótico adaptable al límite de fatiga. Con este propósito se empleó una función de la forma:

$$\Delta\sigma = A - B \cdot \tanh\left(\frac{\log(N_R) - C}{D}\right) \quad (4.1)$$

siendo $\Delta\sigma$ la variación de la tensión aplicada y A, B, C y D constantes.

Las asíntotas se determinan por los valores A+B y A-B, como se muestra en el gráfico de la Figura 4.7, ya que la función de la tangente hiperbólica (tanh) varía desde -1 a +1.

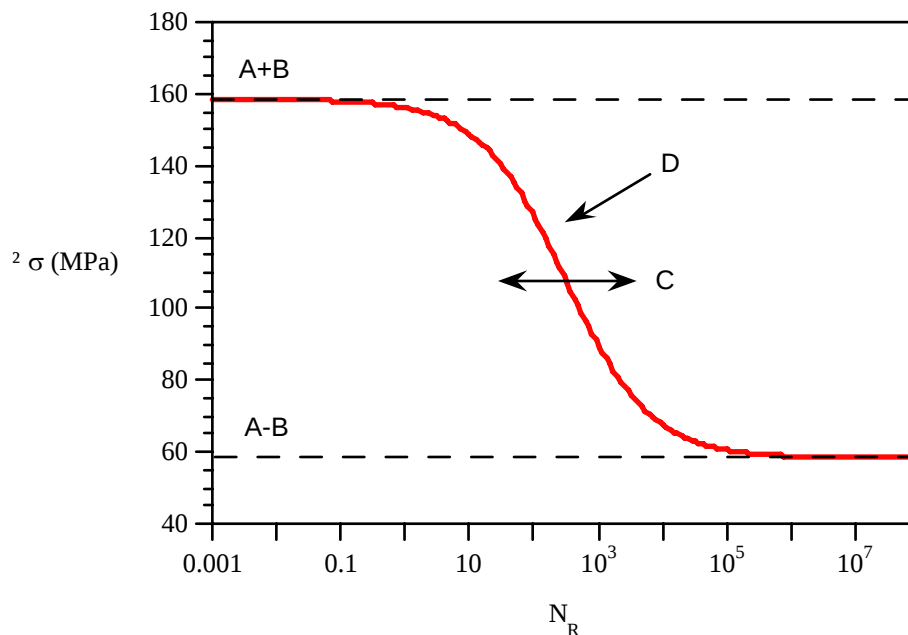


Figura 4. 7. Representación de la función (4.1) y de sus parámetros.

Los parámetros C y D representan, respectivamente, la traslación horizontal, que define la durabilidad del material, y la pendiente de la curva. El software computacional usado ajusta una curva a los valores experimentales obtenidos empleando el método de los mínimos cuadrados. Posteriormente, se trunca la curva y se emplea la mitad derecha de la misma para obtener un gráfico típico para poder representar las curvas de Wöhler.

Las correspondientes curvas de Wöhler (curvas S-N) para cada material, que proporcionan el número de ciclos hasta la rotura del mismo para cada nivel de

amplitud de esfuerzos aplicados, se presentan en los gráficos de las Figuras 4.8 a 4.11. En todos los casos se presentan, simultáneamente, las curvas con ambos tipos de forma de onda aplicada.

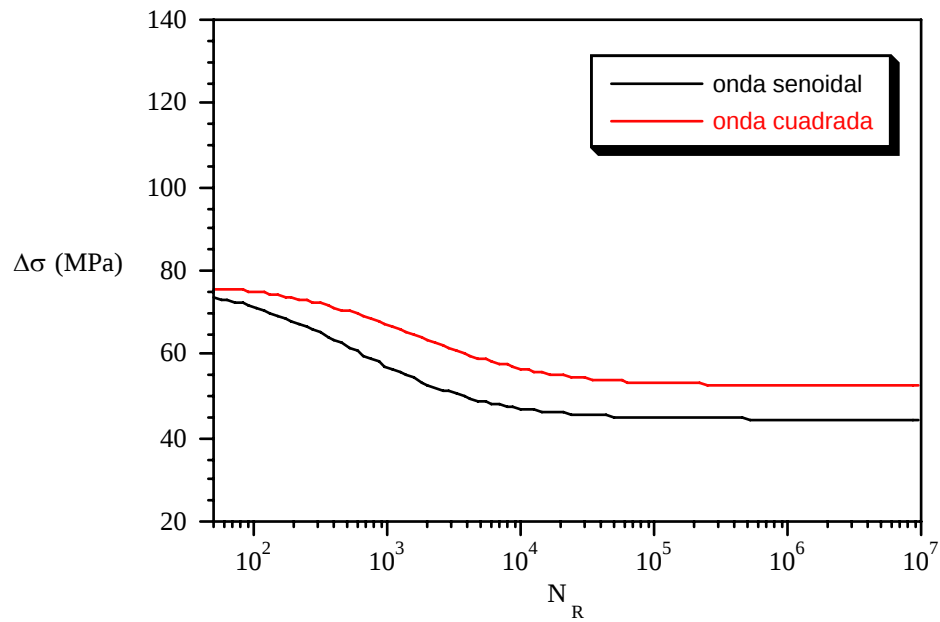


Figura 4.8. Curva S-N para el material R.

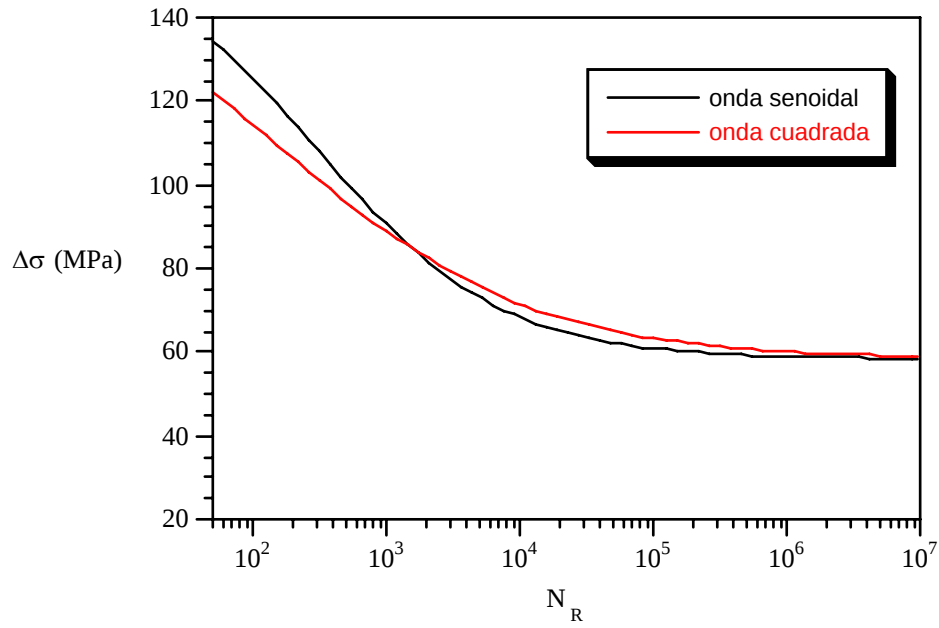


Figura 4.9. Curva S-N para el material PR35.

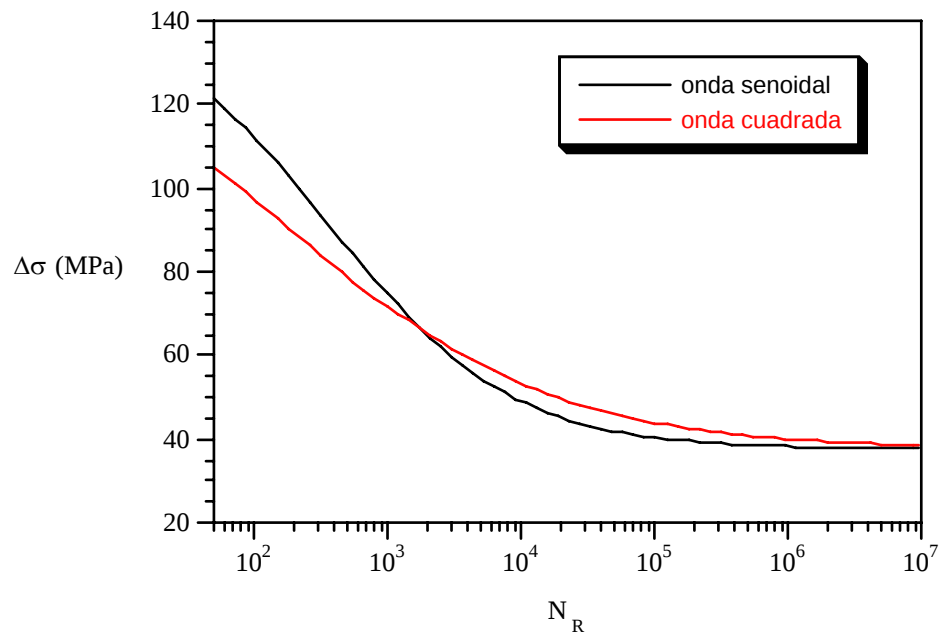


Figura 4.10. Curva S-N para el material PS35.

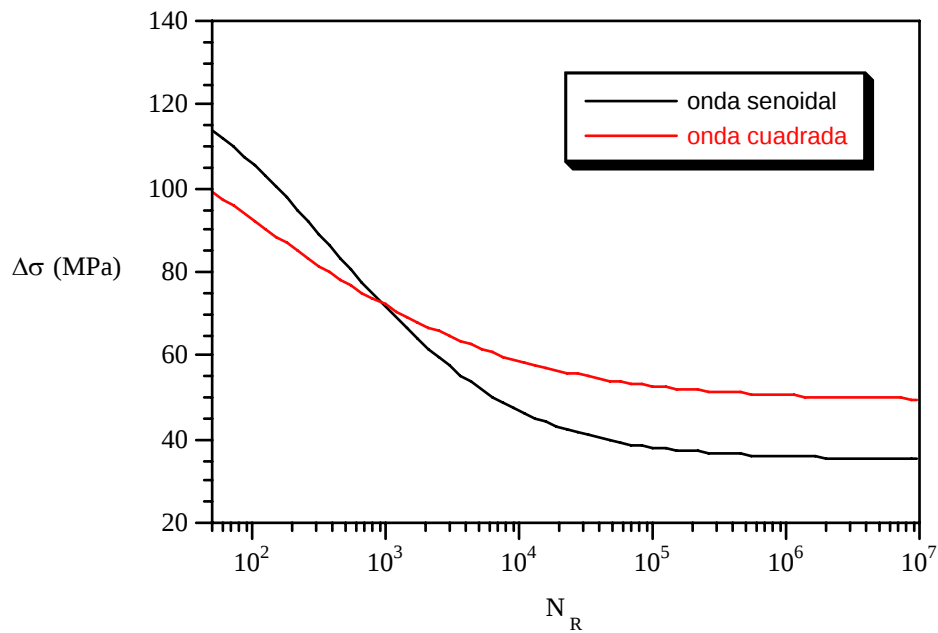


Figura 4.11. Curva S-N para el material PS25.

3.2.2 Evolución de la rigidez y de la temperatura

Los datos obtenidos durante la realización de los ensayos fueron almacenados y tratados debidamente para analizar gráficamente los resultados encontrados. Los diagramas fueron creados empleando el programa Kaleidagraph. Para cada uno de los ensayos realizados, variando material, forma de onda y amplitud de carga, se representan dos primeros gráficos, que recogen la evolución de la rigidez y la variación de temperatura en función de los ciclos aplicados en cada ensayo. El parámetro de rigidez se ha calculado a través de un módulo de elasticidad aparente, E_{ap} , determinado por la expresión

$$E_{ap} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\Delta P}{A \cdot \frac{\Delta L}{l_0}} = \frac{\Delta P \cdot l_0}{A \cdot \Delta L} \quad (4.2)$$

siendo $\Delta\sigma$ la variación de tensión aplicada; ΔP la variación de la carga aplicada; A el área de la sección de la zona calibrada de la probeta; ΔL la variación de longitud experimentada por el material, medida a través del desplazamiento del actuador o a partir de las medidas del extensómetro; y l_0 la base de medida empleada.

En el gráfico mostrado en la Figura 4.12 se ha representado la evolución típica de la rigidez de los materiales, o módulo de elasticidad aparente, E_{ap} , en función del número de ciclos aplicados en el ensayo, N , bajo la acción de los diferentes niveles de variación tensional. Dichos niveles se han indicado en el gráfico expresando el esfuerzo máximo aplicado, correspondiente a cada caso, como un porcentaje de la resistencia del material en condiciones dinámicas, σ_R , calculado en el apartado 3.1 de este capítulo. Por otro lado, en el gráfico de la Figura 4.13 se presenta la evolución típica del incremento de temperatura durante el desarrollo de cada uno de los ensayos.

Para realizar el análisis comparativo de los resultados obtenidos de las probetas ensayadas, con ondas de carga senoidal y cuadrada, se han considerado las mediciones que se realizaron sobre la variación de la longitud total de las probetas, ya que es la medida efectuada en todos los ensayos.

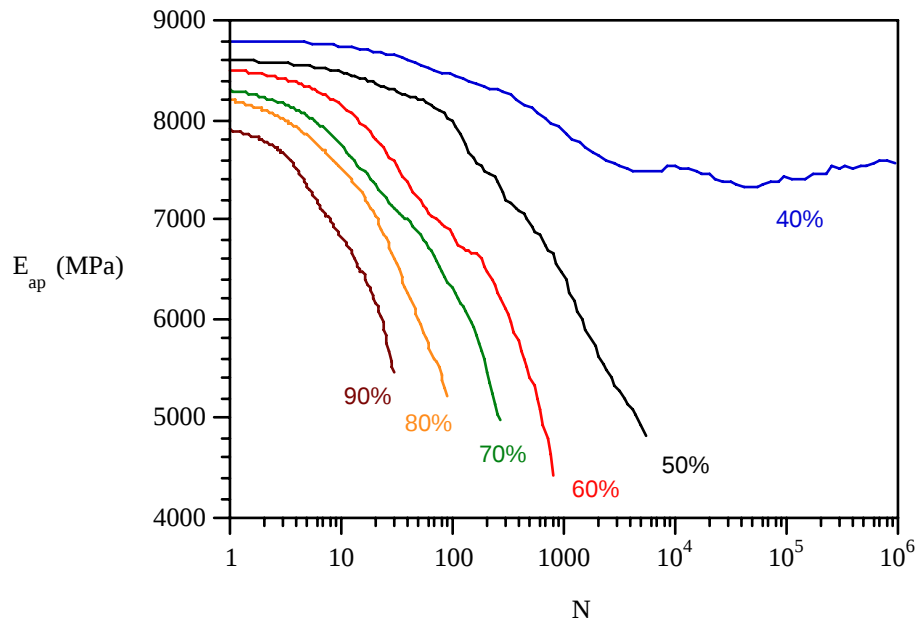


Figura 4.12. Evolución de la rigidez del material en función de N bajo diferentes estados tensionales.

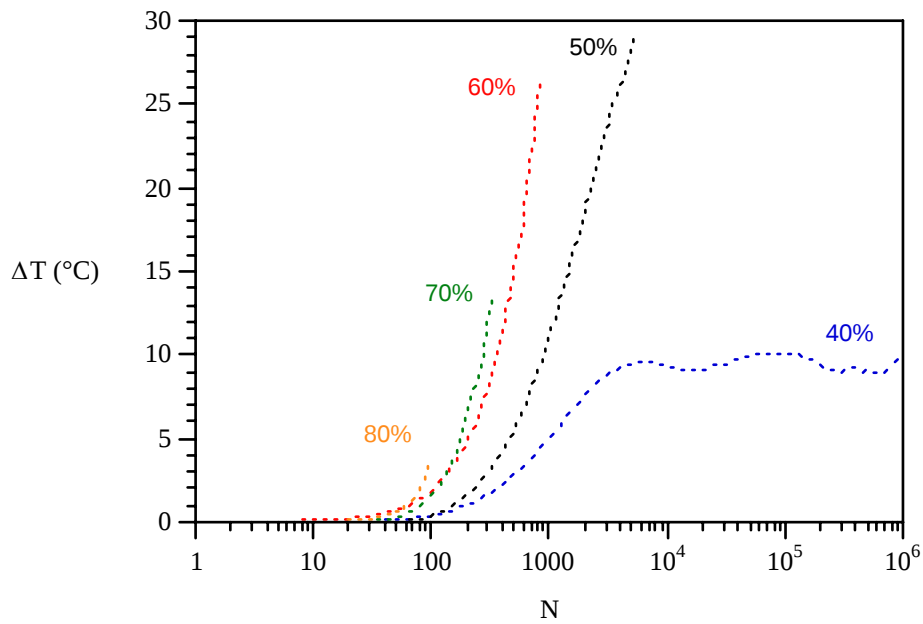


Figura 4.13. Evolución de la temperatura del material en función de N bajo diferentes estados tensionales.

El comportamiento en fatiga de cada material bajo cada tipo de sollicitación (onda de carga de función senoidal o cuadrada) se describe por la diferente evolución del módulo de elasticidad aparente y de la temperatura dependiendo de la amplitud de la variación de carga aplicada. En los gráficos de las Figuras IV.1 a IV.8 del Anexo IV de esta Tesis se muestran los resultados encontrados para cada uno de los materiales ensayados, representándose, en cada caso, la evolución conjunta del módulo de elasticidad aparente y del incremento térmico.

3.3 Estudio fractográfico

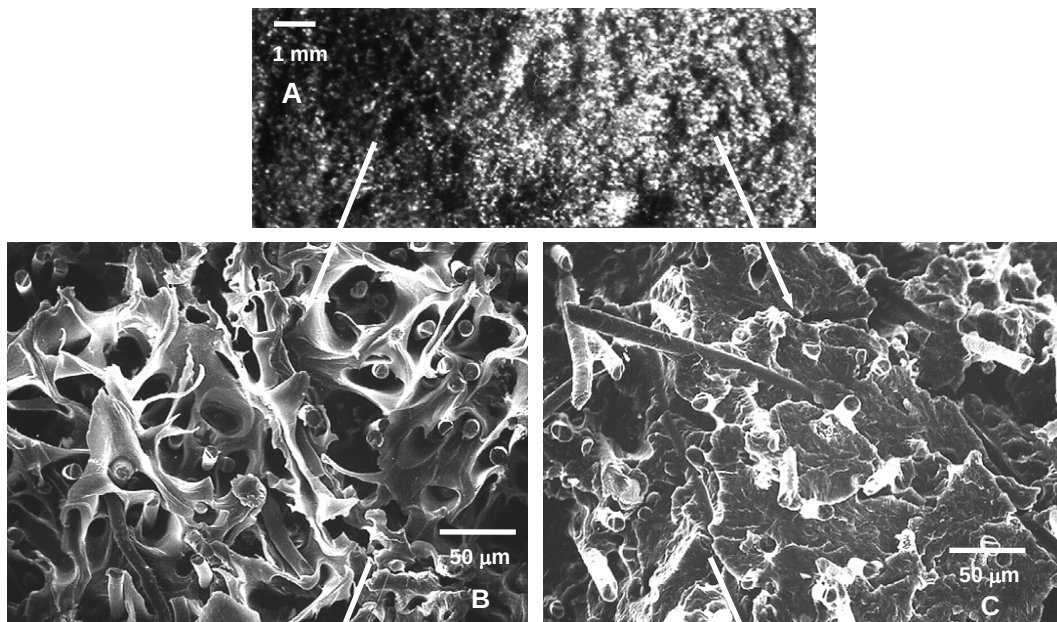
Para apreciar el aspecto macroscópico de las superficies de rotura de los materiales ensayados se realizaron fotografías a 10 aumentos de cada una de las probetas ensayadas. De la observación de las fotografías correspondientes al material de PA reforzada siempre se verificó la existencia de dos zonas de diferente tonalidad, lo que sugiere la existencia de dos posibles mecanismos de fisuración y rotura diferenciables. Para obtener un conocimiento más preciso de estas dos zonas, se procedió a metalizar las superficies de rotura de las probetas con la finalidad de poder observarlas empleando técnicas de microscopía electrónica de barrido. En la Fractografía 4.1A se puede apreciar el aspecto general de la superficie de rotura total analizada a 10 aumentos, mostrando las dos zonas anteriormente referenciadas, así como un detalle de cada una de ellas tomadas a través del microscopio electrónico, a 350 aumentos.

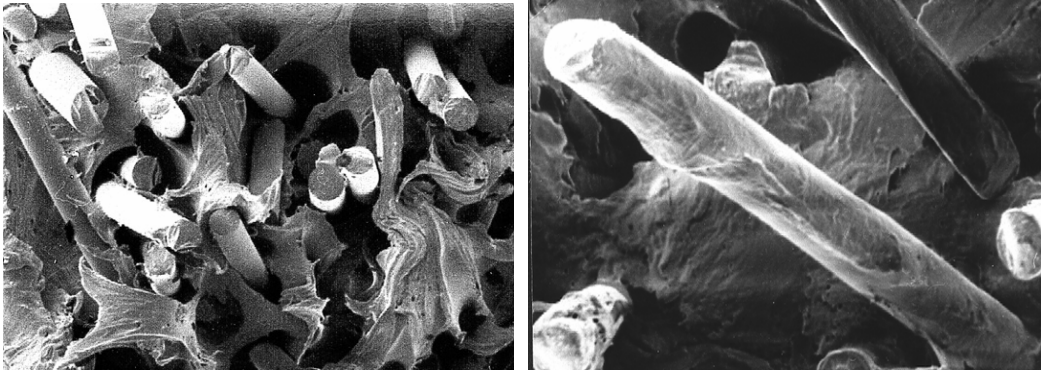
La zona de tonalidad oscura (Fractografía 4.1B) se asocia a un mecanismo de rotura tras el cual la matriz se encuentra altamente deformada y, sin embargo, la zona de tonalidad clara (Fractografía 4.1C) se identifica con un proceso de rotura frágil de la matriz para el que no se aprecian grandes deformaciones en su seno.

Una nueva observación de cada región a mayor escala revela que en la zona donde se aprecia alta deformación de la matriz, probablemente afectada por el aumento de temperatura, las fibras aparecen totalmente limpias y desprovistas del agente

adherente que afianza la unión entre ellas y la matriz (Fractografía 4.1D tomada a 750 aumentos). Sin embargo, en la zona donde la matriz presenta una baja deformabilidad o estiramiento, las fibras aparecen recubiertas del material adhesivo (Fractografía 4.1E tomada a 1500 aumentos).

En la zona de tonalidad oscura se establecería un mecanismo de rotura inicial en el que la pérdida de adherencia entre la fibra y la matriz condiciona la inestabilidad del sistema, obligándose a la matriz a soportar los esfuerzos descargados por las fibras que producen su elevado estiramiento y deformación. La zona de tonalidad clara establecería el mecanismo de rotura final en el material, que sobreviene existiendo una colaboración conjunta de reparto y transferencia de carga entre la fibra y la matriz





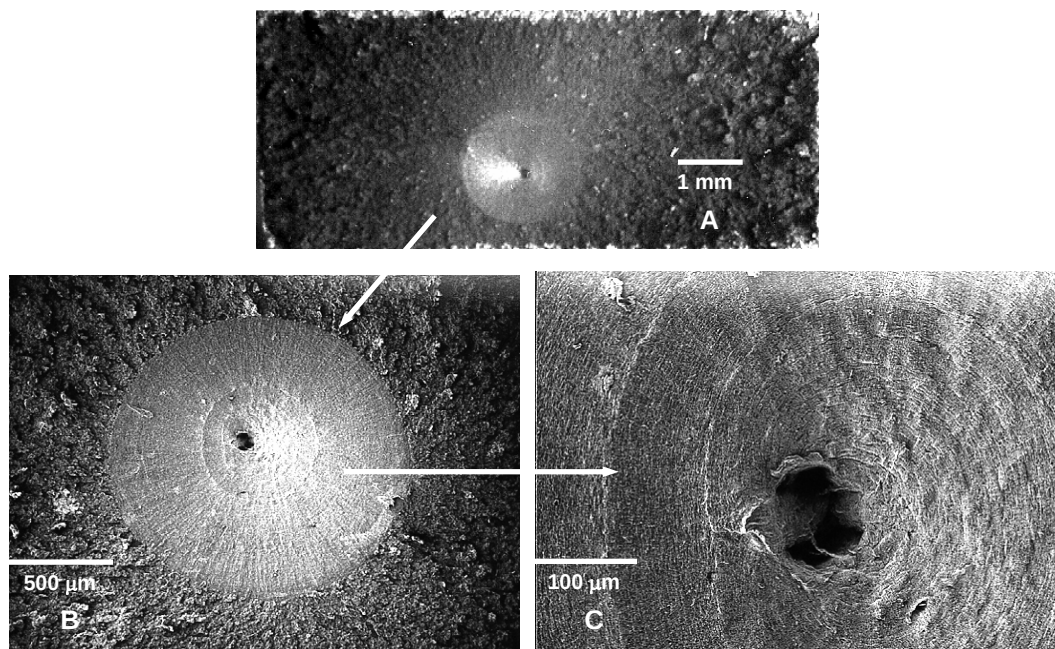
Fractografía 4.1.- *Vista general y detalles de la morfología de la superficie de fractura en las PA reforzadas.*

La morfología de la superficie de fractura descrita anteriormente es común en todos los ensayos de fatiga realizados sobre las probetas de PA reforzada, independientemente del tipo de onda que se haya considerado y del nivel tensional impuesto.

Asimismo, las observaciones realizadas han sido siempre consistentes con independencia del tipo de matriz de PA (6 ó 6.6) y de la cantidad de refuerzo en la misma (25 ó 35% en peso).

En cuanto al material de resina acetálica, las observaciones fractográficas realizadas evidencian, en todos los casos, un mecanismo de rotura propio y típico iniciado a partir de un defecto, poro u oclusión de aire presente en el material, de geometría circular, como el mostrado a 10 y 35 aumentos en las Fractografías 4.2A y 4.2B, respectivamente. Este defecto actúa como concentrador de tensiones y su crecimiento, o propagación, se produce en la dirección radial. Este hecho puede inferirse a partir de las estrías concéntricas observadas a 200 aumentos en la Fractografía 4.2C, que se generan a partir del defecto inicial. Estas estrías no fueron observadas en las probetas rotas en condiciones estáticas, por lo que cabría esperar una posible relación entre la velocidad de propagación del defecto o grieta en el material y la generación de las citadas estrías con el número de ciclos aplicados para cada nivel tensional impuesto. El resto de la superficie de rotura

presenta un aspecto de gran homogeneidad, similar al mostrado por el material al romper en condiciones estáticas.



Fractografía 4.2.- *Vista general y detalles de la morfología de la superficie de fractura en la resina acetálica.*

La morfología de la superficie de fractura descrita es consistente y repetitiva en todos los ensayos de fatiga realizados sobre las probetas de resina acetálica, R, independientemente del tipo de onda aplicada y del nivel de variación tensional impuesto.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se puede comprobar que el aumento del nivel tensional aplicado sobre el material establece una disminución de la rigidez en el mismo. Gráficamente se puede observar que a mayores sollicitaciones se produce una disminución acusada en la rigidez del material, como pone de manifiesto la Figura 4.14.

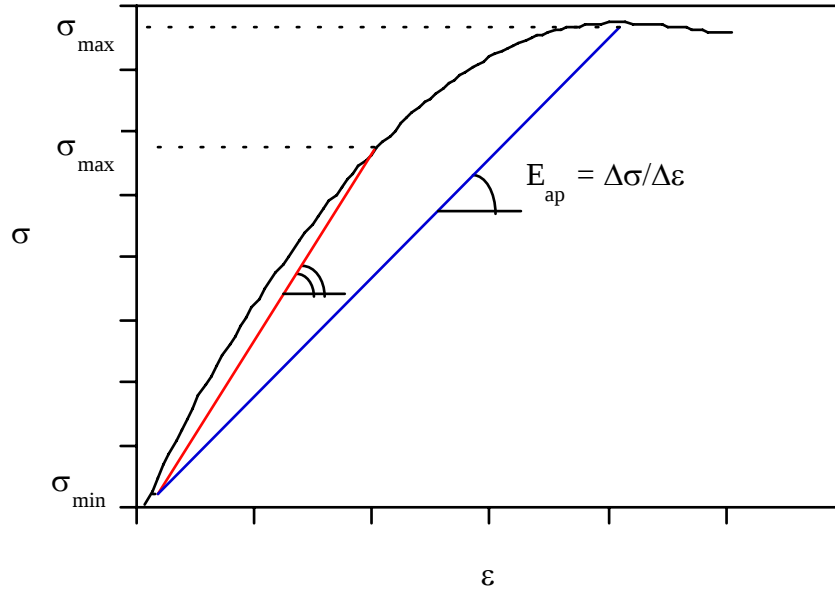


Figura 4.14. Variación de la rigidez inicial del material con el esfuerzo aplicado.

Este efecto se observa claramente considerando, como ejemplo representativo, los valores en el origen del gráfico de la Figura 4.12, donde se han recogido todos los niveles tensionales aplicados.

Por otro lado, se puede establecer una correlación del módulo de elasticidad aparente, E_{ap} , con el incremento térmico acusado por el material, ΔT . El gráfico de la Figura 4.15 muestra un ejemplo de la clara variación del módulo de elasticidad aparente de forma acoplada al incremento térmico en función del número de ciclos del ensayo de fatiga. Los fuertes aumentos de temperatura provocan una acusada caída del módulo de elasticidad.

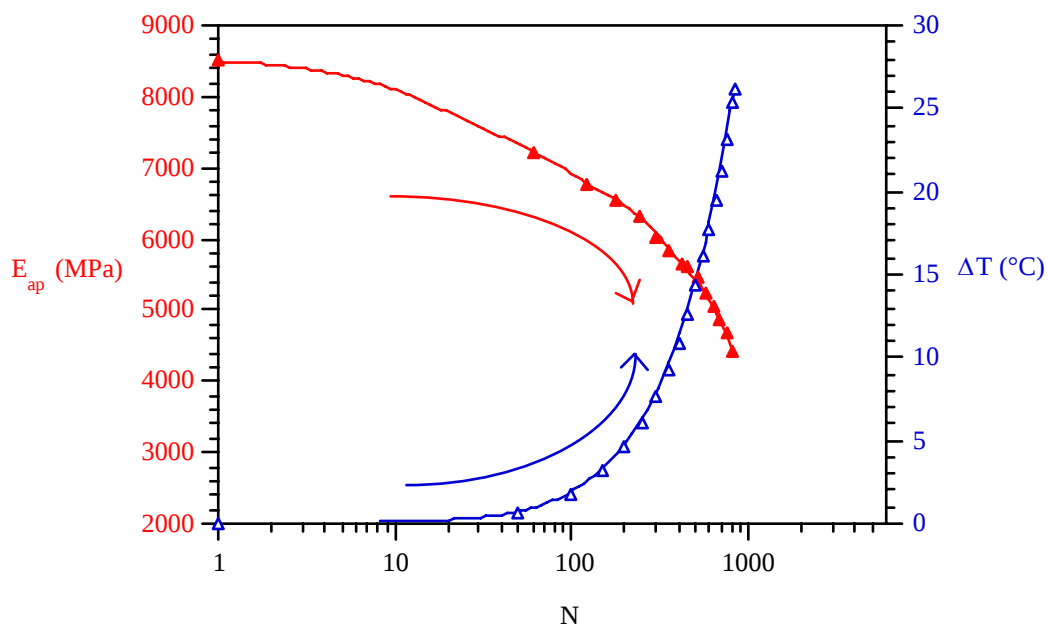


Figura 4.15. Variación de E_{ap} y de ΔT (PR35 ensayado bajo $\sigma_{máx} = 80\% \sigma_R$).

4.1 Efecto del nivel tensional

En la Figura 4.16 se puede apreciar el aspecto típico de la representación de la evolución de la rigidez del material, definida a partir del módulo de elasticidad aparente, E_{ap} , y de su temperatura durante el ensayo, bajo diferentes estados tensionales.

El aumento de temperatura determinado en cada caso, junto con la previsible propagación de fisuras o defectos en el material, justifica el continuado aumento de

flexibilidad de la probeta previo a la rotura. Para amplitudes de carga elevadas, se observa un aumento de flexibilidad inmediato debido, probablemente, a efectos de rotura locales. Como la temperatura inicia su elevación después de un número mínimo de ciclos, creciente conforme $\Delta\sigma$ disminuye, para los valores de $\Delta\sigma$ altos se produce la rotura pronto, previsiblemente por efectos mecánicos, evitando que la temperatura alcance valores elevados. Para valores intermedios de $\Delta\sigma$ la temperatura alcanza valores cada vez más elevados a medida que $\Delta\sigma$ descende, ya que el tiempo hasta rotura es mayor. La flexibilidad comienza a variar rápidamente debido a la variación de temperatura, siguiendo su evolución. Para valores de $\Delta\sigma$ próximos a $\Delta\sigma_6$ se observa una tendencia a la estabilidad térmica, pero el efecto de la sollicitación dinámica conduce a la rotura, manteniendo una continua pérdida de la flexibilidad y llevando a un segundo tramo de elevación de temperatura. Finalmente, para $\Delta\sigma_6$, como ya se ha dicho, la temperatura y la flexibilidad se estabilizan.

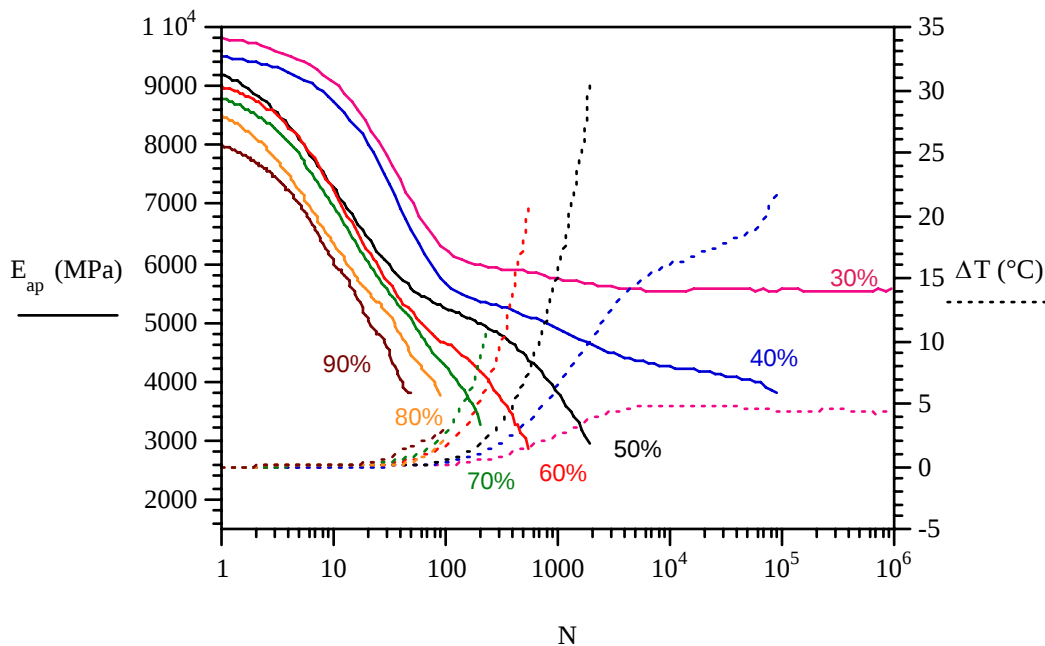


Figura 4.16. PS25 ensayado con ondas senoidales

4.2 Efecto del tipo de onda

Para analizar la influencia de la forma de la onda sobre el material, se han representado en el Anexo IV de esta Tesis los gráficos de las Figuras IV.9 a IV.24. En ellos se combinan, para cada material, los dos ensayos correspondientes a las diferentes formas de ondas de carga para un mismo nivel de esfuerzos aplicado.

En la Tabla 4.6 se presenta un resumen los resultados obtenidos para cada uno de los diferentes materiales en estudio. En la misma, se indican los valores de σ_R de todos los materiales, así como los valores de $\Delta\sigma_6$ para cada tipo de onda obtenidos, representantes de su resistencia a fatiga.

Tabla 4.6. Resumen de resultados

Material	R	PR35	PS35	PS25
σ_R (MPa)	81.0	166.8	151.0	140.6
$\Delta\sigma_6$ (MPa) senoidal	44.5	58.4	37.5	35.2
$\Delta\sigma_6$ (MPa) cuadrada	52.6	58.4	37.5	49.2

Los resultados muestran que tanto para las PA como para la R los procesos de fatiga de elevada amplitud de carga provocan una rotura rápida ($<10^4$ ciclos) asociada a un aumento constante de la temperatura del material y a una pérdida de rigidez. Al bajar el nivel de amplitud se llega a alcanzar un estado para el que la temperatura y rigidez se estabilizan, bajo el cual no se produce la rotura alcanzándose 10^6 ciclos ($\Delta\sigma_6$). Este estado es, con referencia al valor de la tensión de rotura, muy inferior para PA ($0.25-0.35\sigma_R$) que para R ($0.55-0.65\sigma_R$). Sin embargo, en valores absolutos, la resistencia a fatiga de ambos es muy próxima, en torno a 50 MPa como valor $\Delta\sigma_6$ en las dos situaciones más resistentes de cada familia.

El aumento de temperatura en el material de resina acetálica, R, bajo la acción de las ondas senoidales se produce de forma más rápida que con ondas cuadradas

ante cualquier estado tensional, como se puede apreciar en el diagrama de la Figura 4.17. Esta evolución térmica justifica que la susceptibilidad a problemas de fatiga, definida por la propia curva $\Delta\sigma$ -N en el gráfico de la Figura 4.8, sea mayor con onda senoidal para la R.

Por lo tanto, para todos los niveles de amplitud de carga estudiados, la R resiste mejor la variación de onda de carga cuadrada que senoidal. La diferencia de fricción molecular inducida sobre el material por los dos tipos de onda y su gran tenacidad así lo establecen.

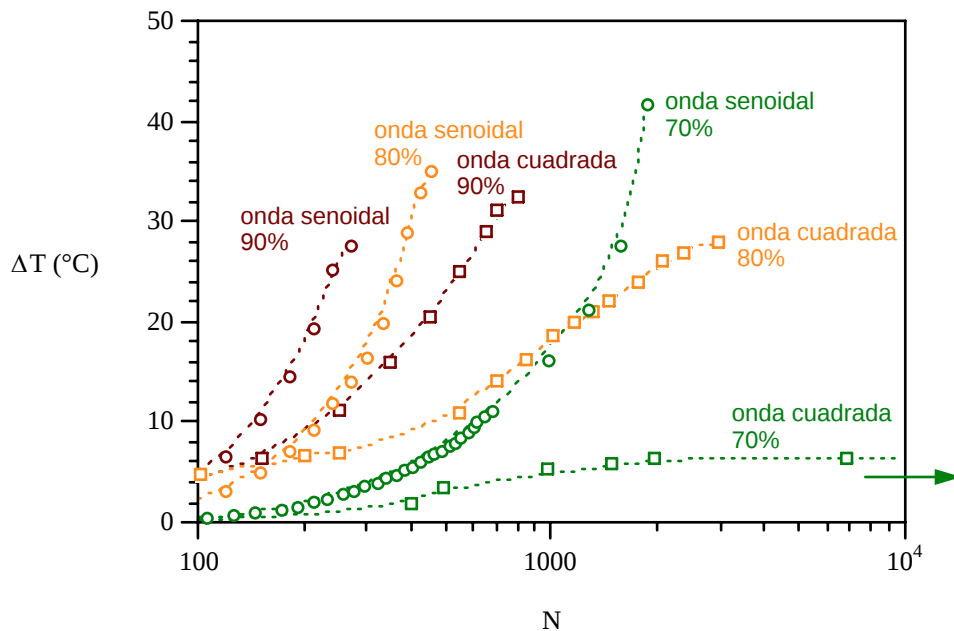


Figura 4.17. ΔT para R bajo diferentes estados tensionales y formas de onda

En el caso de las PA, sin embargo, esta susceptibilidad es mayor para amplitudes de carga altas con la onda cuadrada, como se comprueba del diagrama de Wöhler de los citados materiales (Figuras 4.9, 4.10 y 4.11). Ello es debido a que al ser más rígidas y frágiles, el impacto de cada ciclo provoca un mayor daño, probablemente asociado a roturas y deslizamientos de sus refuerzos y un "crazing" de su matriz. Conforme $\Delta\sigma$ decrece, el efecto del mayor aumento de la temperatura en la onda

senoidal, como se puede apreciar en la evolución térmica indicada en el gráfico de la Figura 4.18, comienza a compensar esta situación, llegando a establecerse un equilibrio entre el efecto de ambos tipos de ondas (igual $\Delta\sigma_6$) e incluso llegando a ser algunas PA, las de menor refuerzo, más resistentes a la fatiga con onda cuadrada (Figura 4.11).

Por lo tanto, las PA reforzadas presentan, para los dos tipos de onda, un comportamiento similar en fatiga para niveles de amplitud de carga próximos al de resistencia a fatiga, donde el efecto del impacto repetitivo del tren de ondas cuadradas es compensado por el mayor efecto de calentamiento de las ondas senoidales. Sin embargo, para altas cargas el efecto del impacto en cada ciclo establece que estos materiales sean más susceptibles a los mecanismos de fatiga con onda cuadrada que con onda senoidal.

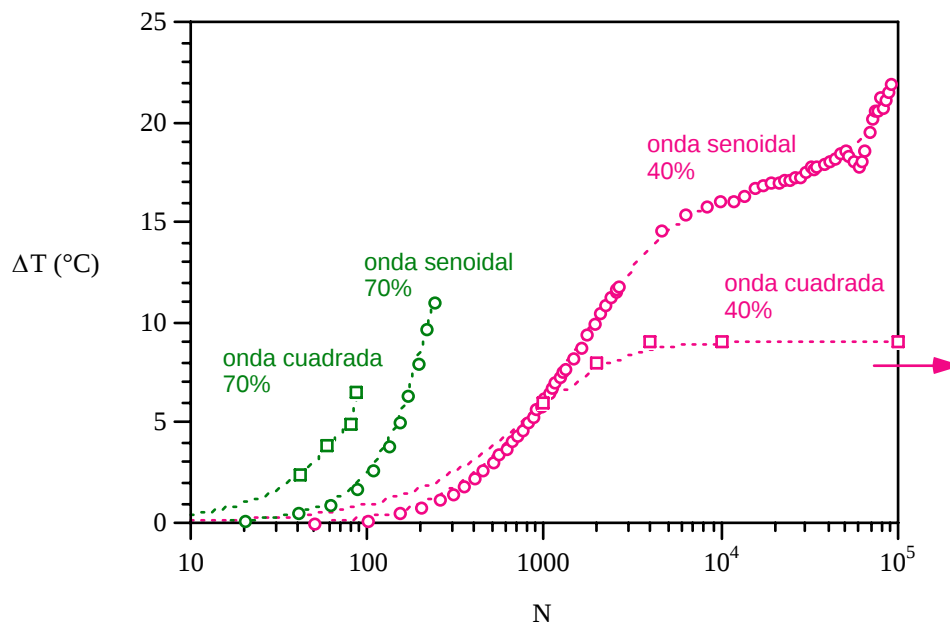


Figura 4.18. ΔT para PS25 bajo altos y bajos estados tensionales y formas de onda

4.3 Efecto del material

A pesar de la diferencia en susceptibilidad y mecanismos de rotura, ambos tipos de materiales, PA y R, presentan imposiciones en límites de fatiga equivalentes en valor absoluto, lo que les iguala ante situaciones de diseño, atendiendo a este tipo de sollicitación. Sin embargo, la mayor capacidad resistente de las PA frente a la R, unido a su menor deformabilidad, establece, bajo criterios de selección de material frente a la resistencia ante cargas elevadas, un mayor margen de seguridad.

Dentro de la familia de PA, a igualdad de refuerzo, comparando PR35 con PS35, es la 6.6 (PR35) la que ha presentado una mayor resistencia a la fatiga o límite de endurancia, definido en este estudio a partir del parámetro $\Delta\sigma_6$.

Por otro lado, el aumento de refuerzo incorporado a una misma matriz de PA, comparando PS35 con PS25, establece una mejora de estos materiales compuestos sobre la resistencia a fatiga.

5 EFECTO DEL TIEMPO DE ESPERA

5.1 Resultados

En las Tablas 4.7 a 4.10 se presentan los resultados encontrados en los ensayos de fatiga con onda senoidal realizados sobre los 4 materiales en estudio. Se indica, para cada uno de ellos, tanto el código de identificación de las probeta y los parámetros de ensayo empleados, como la variación porcentual de carga aplicada con respecto de los valores de rotura dinámica (ΔP_R), los valores de pico de carga y tensión aplicadas (máximo-mínimo), el tiempo de espera aplicado (t_e) y el número de ciclos soportado hasta la rotura de cada probeta o hasta el final del ensayo (N_R). En las tablas se han incorporado, como referencia, los valores de $t_e=0$ s, correspondientes a los ensayos de fatiga continua o sin tiempo de espera.

Tabla 4.7. Resultados generales para R (Sección recta = 44 mm²).

ΔP_R (%)	P (N) σ (MPa) máx-mín	t_e (s)	Probeta	N_R
90-5	3204-178 72.82 - 4.04	0	R-173	300
		30	R-33	406
			R-34	483
		180	R-35 R-36	489 528
80-5	2850-178 64.80 - 4.04	0	R-177	428
		30	R-37	854
			R-38	842
		180	R-39 R-40	1791 1500
		900	R-50	75000
		0	R-180	1967

70-5	2490-178	30	R-46	260700 ⁽¹⁾
	56.59 - 4.04		R-48	330000 ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Variables estabilizadas. Ensayos interrumpidos sin rotura

Tabla 4.8. Resultados generales para PR35. (Sección recta = 39.40 mm²)

ΔP_R (%)	P (N) σ (MPa) máx-mín	t_e (s)	Probeta	N_R
60-5	3942-328 100.05 - 8.32	0	PR35-16	851
		30	PR35-31	929
			PR35-39	896
		180	PR35-40	1695
			PR35-71	1697
300	PR35-79	5045		
50-5	3285-328 83.37 - 8.32	0	PR35-35	5510
		30	PR35-72	11190
			PR35-73	14471
		180	PR35-74	53099
			PR35-75	72999
300	PR35-78	261000		
40-5	2628-328 66.70 - 8.32	0	PR35-45	$1.23 \cdot 10^{6(1)}$
		30	PR35-77	$978000^{(1)}$

⁽¹⁾ Variables estabilizadas. Ensayos interrumpidos sin rotura

Tabla 4.9. Resultados generales para PS35. (Sección recta = 40.40 mm²)

ΔP_R (%)	P (N) σ (MPa) máx-mín	t_e (s)	Probeta	N_R
60-5	3636-303 90.00 - 7.50	0	PS35-30	534
		30	PS35-38	470
			PS35-39	422
		180	PS35-41	577
			PS35-44	580
50-5	3030-303 75.00 - 7.50	0	PS35-33	2265
		30	PS35-40	2666
			PS35-46	3209
		180	PS35-48	11085

40-5	2424-303 60.00 - 7.50	0	PS35-35	531000
		30	PS35-49	803549
			PS35-50	565328

Tabla 4.10. Resultados generales para PS25. (Sección recta = 42.95 mm²)

ΔP_R (%)	P (N) σ (MPa) máx-mín	t_e (s)	Probeta	N_R
60-5	3624-302 84.38 - 7.03	0	PS25-48	548
		30	PS25-30	483
			PS25-31	471
		180	PS25-32 PS25-33	550 542
40-5	2416-302 56.25 - 7.03	0	PS25-19	96796
		30	PS25-20	481441
			PS25-221	394958
		180	PS25-174	$1.21 \cdot 10^6$ ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Variables estabilizadas. Ensayos interrumpidos sin rotura

5.1.1 Curvas de Wöhler

Un ejemplo de la representación gráfica de la variación de la tensión aplicada frente al número de ciclos de rotura (N_R) de los materiales, se muestra en el gráfico de la Figura 4.19, en el que se puede apreciar, claramente, el aumento del tiempo de vida cuando al material se le permite recuperar durante un largo periodo de tiempo.

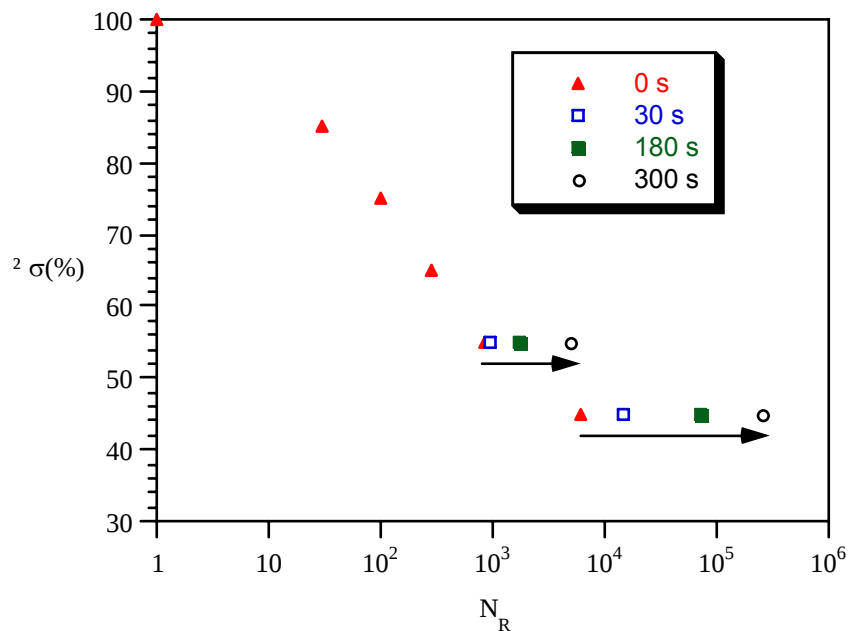


Figura 4.19. Incremento de la vida en fatiga con el tiempo de espera (PR35).

Para cuantificar el efecto del incremento del tiempo de vida en los materiales, originado por la aplicación de los diferentes tiempos de espera, se hizo uso de la función de la tangente hiperbólica, ya empleada en la caracterización previa del comportamiento del material en fatiga continuada. Los gráficos obtenidos fueron truncados a los 300 ciclos, lo cual se justifica por dos motivos:

- Previo a este número de ciclos no existe diferencia teórica en los resultados, ya que el primer tiempo de espera todavía no ha sido aplicado.
- Desde un punto de vista práctico, la región de interés es aquella que representa la durabilidad del material a un número de ciclos elevado.

Los gráficos de las Figuras 4.20 a 4.23 presentan las curvas de Wöhler para los cuatro materiales analizados, indicándose el porcentaje de la variación de tensión aplicada con respecto de la tensión de rotura dinámica de cada material, en función del número de ciclos hasta su rotura, N_R .

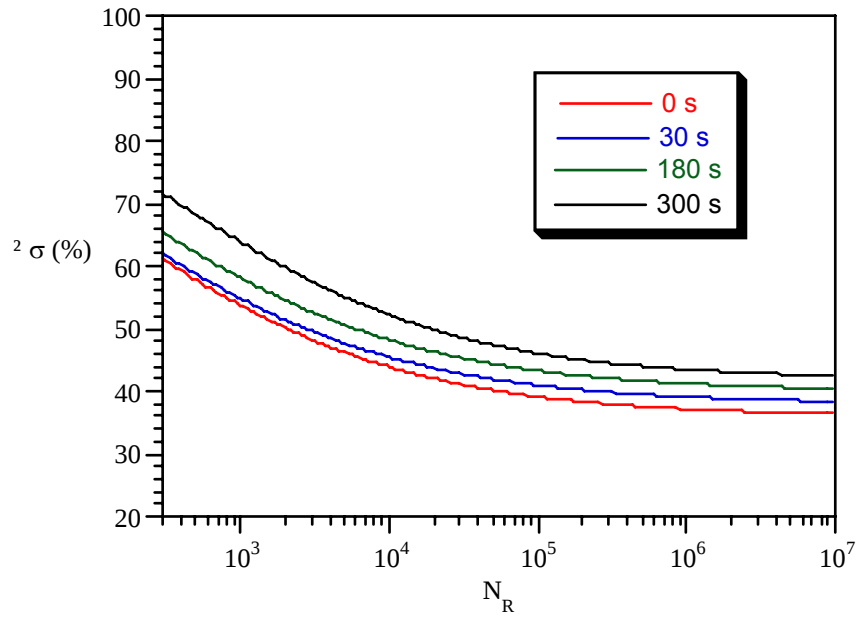


Figura 4.20. Curvas de Wöhler para PR35, mostrando la influencia de t_e .

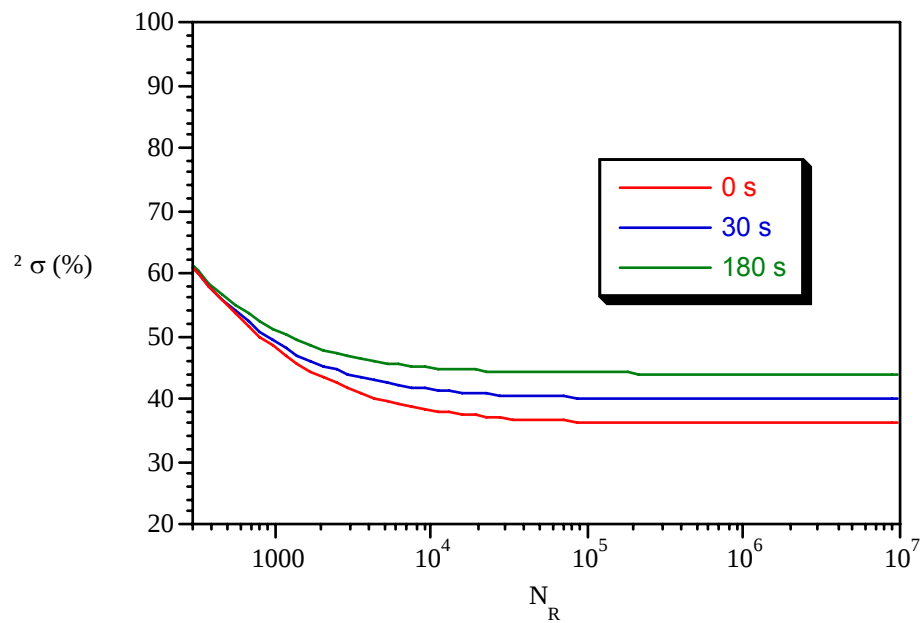


Figura 4.21. Curvas de Wöhler para PS35, mostrando la influencia de t_e .

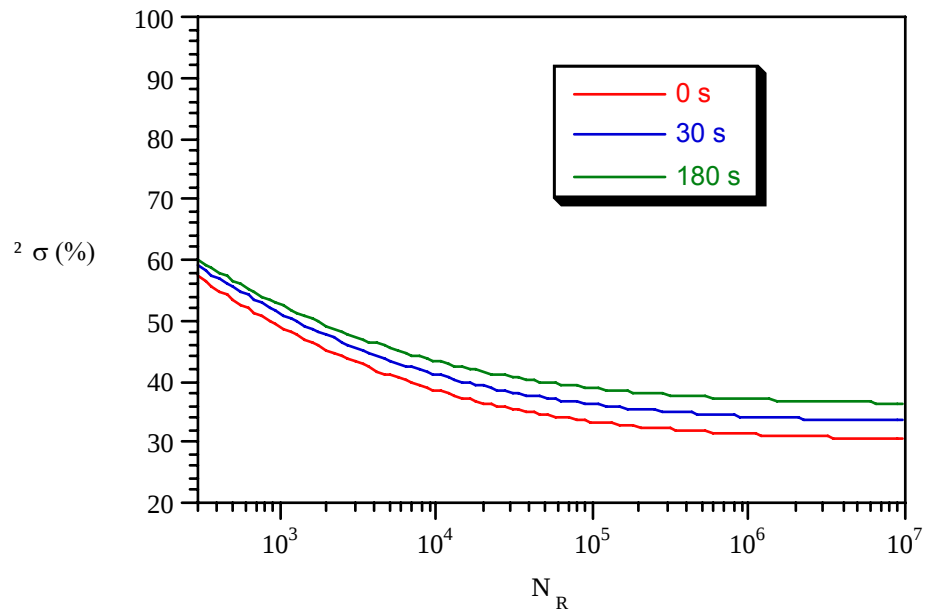


Figura 4.22. Curvas de Wöhler para PS25, mostrando la influencia de t_e .

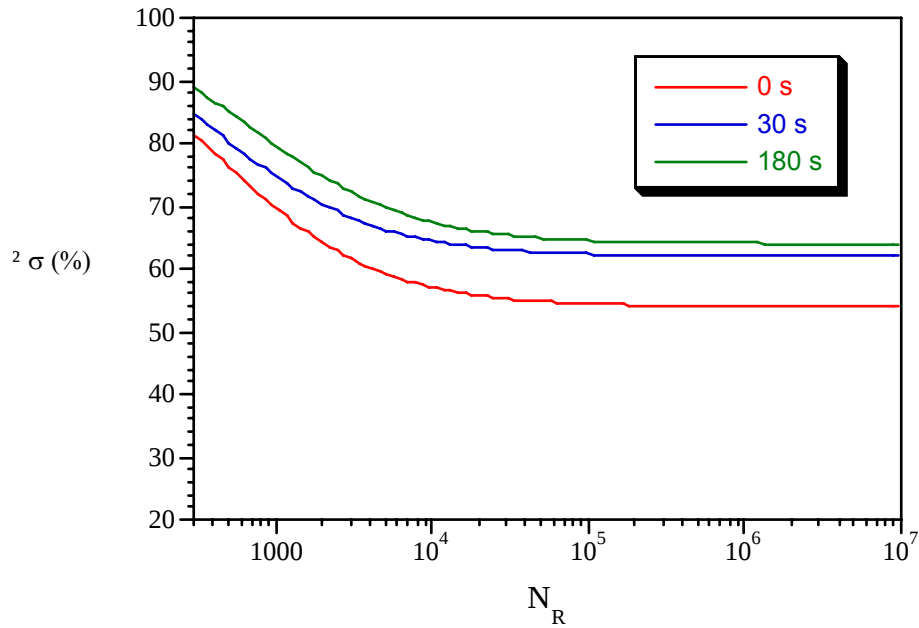


Figura 4.23. Curvas de Wöhler para R , mostrando la influencia de t_e .

A partir de las constantes A , B y C que definen los ajustes experimentales de la tangente hiperbólica para cada material (ver diagrama de la Figura 4.7), en la Tabla 4.11 se presentan los valores que, como consecuencia de la aplicación de los diferentes tiempos de espera, establecen los incrementos del límite de fatiga de cada material (evolución de $A-B$ en %) así como del aumento del tiempo de vida (evolución de la constante C) para los diferentes estados tensionales.

Tabla 4.11. Valores de los ajustes experimentales para cada material

	t_e (s)	0	30	180	300
PR35	C	-6.86	-6.93	-4.64	0.55
	A-B	36	38	40	42
PS35	C	2.18	2.17	2.15	—
	A-B	36	40	44	—
PS25	C	-4.79	-4.55	-3.83	—

	A-B	30	33	36	—
R	C	2.67	2.66	2.87	—
	A-B	54	62	64	—

Analizando los valores obtenidos se advierte un incremento claro de la resistencia a la fatiga (A-B) en todos los materiales, tanto mayor cuanto más elevado sea el tiempo de espera que interrumpe el ensayo de fatiga. Asimismo, se aprecia que, cuanto mayor es el tiempo de espera aplicado, los ajustes obtenidos desplazan las curvas de Wöhler más hacia la derecha, significando en general un aumento del tiempo de vida neto de los materiales.

5.1.2 Evolución de la rigidez y de la temperatura

Los resultados de cada uno de los ensayos realizados se representan en un diagrama que muestra la evolución temporal del incremento térmico en el material, ΔT , medida tomando como referencia el valor inicial de la temperatura ambiente, y del módulo de elasticidad aparente, E_{ap} . El comportamiento típico se muestra en el diagrama de la Figura 4.24, donde se puede apreciar el efecto causado por el tiempo de espera en las variables representadas. Ha de notarse que durante la aplicación de estos tiempos de espera no se determina valor alguno de la variable E_{ap} . No obstante, se ha realizado una representación continua de la misma, con el objeto de mostrar gráficamente su recuperación motivada por los intervalos de reposo.

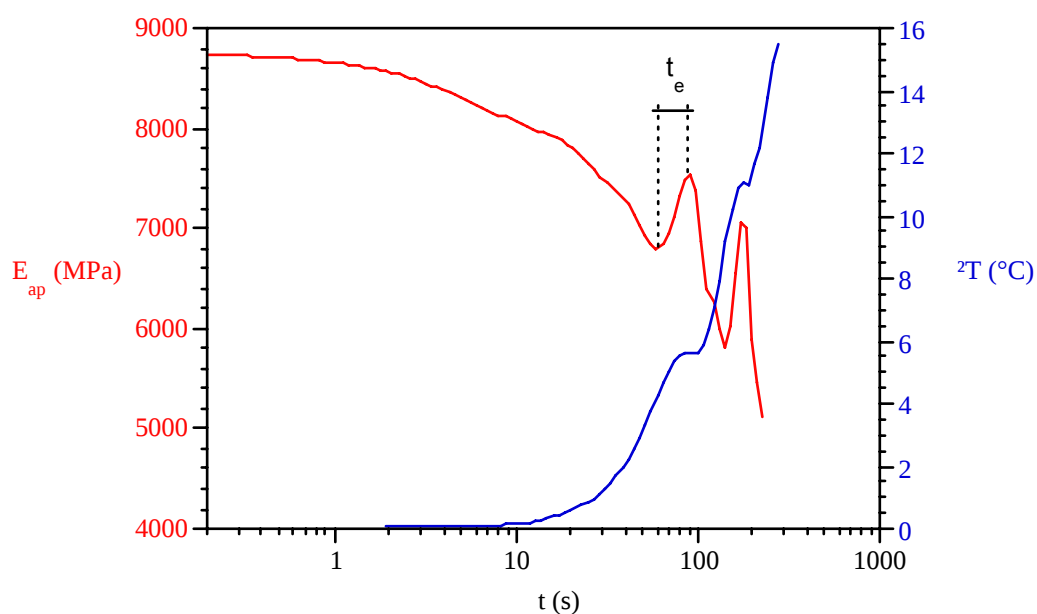


Figura 4.24. Evolución típica del E_{ap} y de ΔT con tiempos de espera.

En los gráficos de las Figuras V.1 a V.8 del Anexo V de esta Tesis se muestran, para cada tipo de esfuerzo aplicado y los correspondientes tiempos de espera (t_e), incluido $t_e = 0$ s, los diagramas del módulo de elasticidad aparente y del incremento térmico superficial para el material de resina acetálica (R) en función del tiempo de duración del ensayo. En los gráficos de las Figuras V.9 a V.16 del Anexo V de esta Tesis se muestran los resultados gráficos para el material de PA 6.6 reforzada con un 35% de fibra de vidrio corta (PR35).

En las Figuras V.17 a V.24 del Anexo V de esta Tesis aparecen los resultados gráficos para el material de PA 6 reforzada con un 35% de fibra de vidrio corta (PS35). Los resultados para el material PS25 no se determinaron gráficamente puesto que arrojaron resultados similares a los de PS35.

5.1.3 Fractografía

El aspecto macroscópico y microscópico de las superficies de rotura de los materiales de PA reforzada, ensayados a fatiga con tiempos de espera, continuó

revelando la existencia de las dos zonas de diferente tonalidad y morfología que establecen los dos mecanismos de rotura concatenados que tienen lugar, tal como se describió en el apartado 3.3 del presente Capítulo. Este hecho supone que los tiempos de reposo aplicados entre trenes de ondas consecutivos no influyen en los mecanismos de rotura, si bien, la existencia de aquéllos aporta un retardo en la aparición de éstos, incrementando la durabilidad del material.

Paralelamente, la morfología de la superficie de rotura de las probetas de resina acetálica, R, ensayadas a fatiga con tiempos de espera, sigue ofreciendo la misma tipología de rotura que la observada en fatiga continua y reseñada en el apartado 3.3. Por lo tanto, al igual que con la PA reforzada, los tipos de mecanismos de rotura en la resina acetálica se muestran independientes de los tiempos de espera contemplados en los ensayos de fatiga.

5.2 Análisis de resultados

Cuando se consideran patrones de variación de esfuerzos discontinuos, es decir, asociados a tiempos de espera, los picos de temperatura alcanzados coinciden, invariablemente, con los valles registrados en la evolución del módulo de elasticidad aparente, como puede apreciarse en el gráfico de la Figura 4.25 en el que el eje de tiempos se ha representado en escala lineal. Se puede constatar, de nuevo, la fuerte influencia que ejerce la temperatura en el comportamiento mecánico de estos materiales de carácter termoplástico.

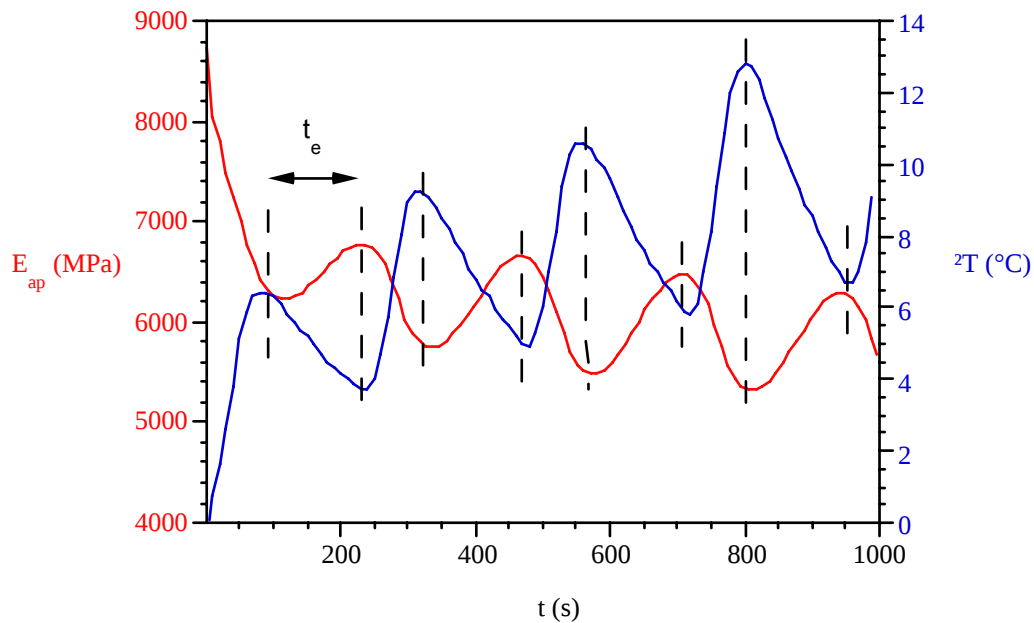


Figura 4.25. Coincidencia de picos y valles para PR35 al 60% con $t_e = 180$ s.

5.2.1 Influencia sobre el comportamiento térmico

Para analizar las fluctuaciones térmicas registradas en los ensayos, en el gráfico de la Figura 4.26 se presenta un ejemplo de cómo el progresivo aumento de temperatura, generado en el seno del material, se interrumpe cuando se detiene la actuación de los trenes de ondas de carga después de los 300 primeros ciclos aplicados a la frecuencia de 5 Hz, correspondientes por tanto a 60 s de ensayo.

En la evolución de la temperatura se puede apreciar una pequeña inercia. Iniciado ya el periodo de parada, la temperatura continúa aumentando durante aproximadamente 20 s hasta alcanzar un máximo, a partir del cual se define el descenso. Esta inercia se manifiesta de nuevo cuando se reinicia la carga.

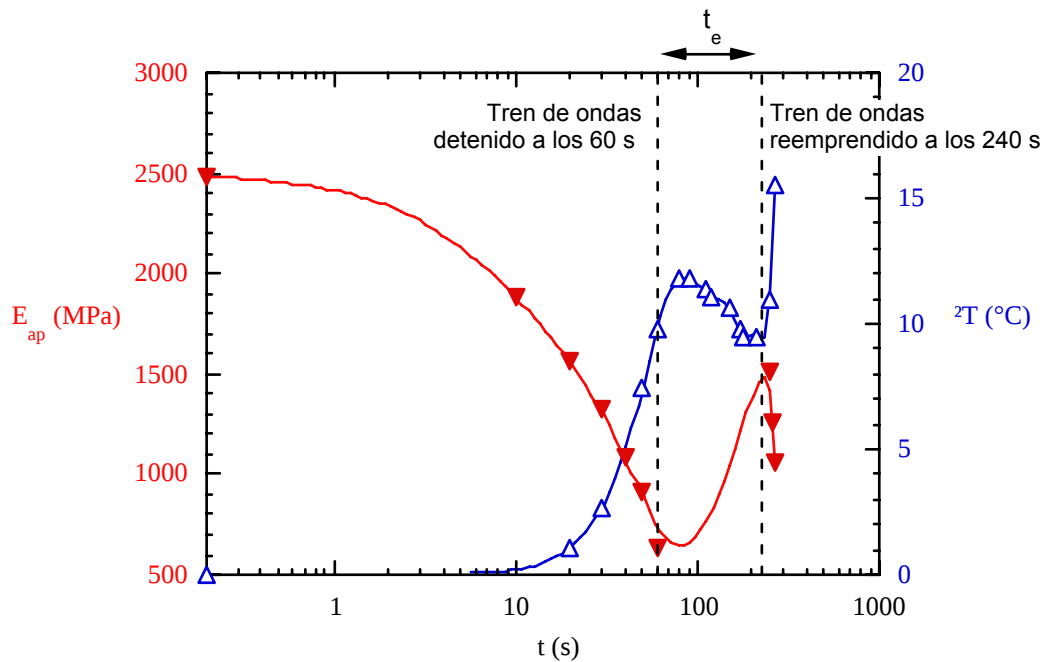


Figura 4.26. Fluctuaciones de temperatura para R al 90% con $t_e = 180$ s.

Debe considerarse que el dispositivo de ensayo empleado establece que la resistencia sensitiva térmica se adosa a la superficie de la probeta. Dado que la fuente generadora de calor no se encuentra necesariamente en ese punto, el calor fluye por conducción hacia el mismo, incluso posteriormente al momento en que la fuente generadora de calor se considera desactivada. Este efecto puede ser observado de acuerdo con el esquema presentado en la Figura 4.27.

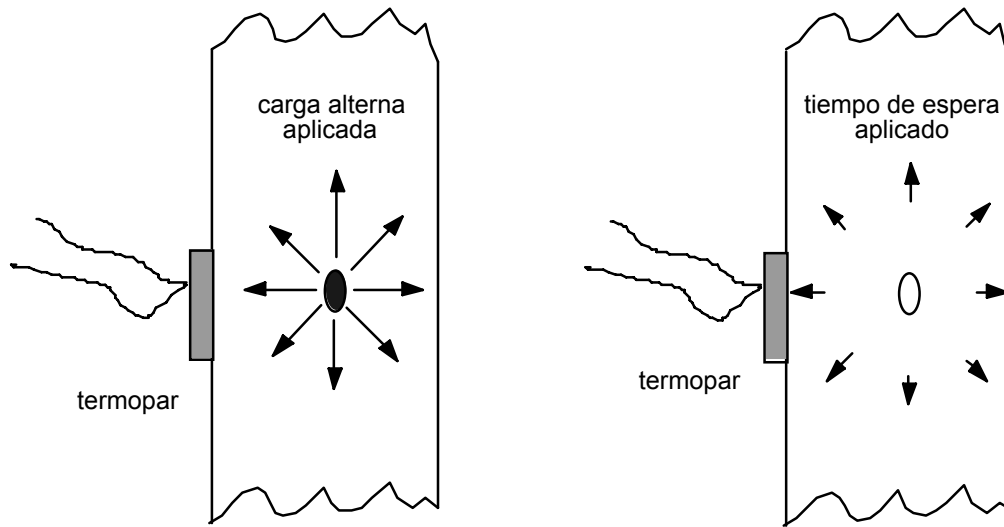


Figura 4.27. Modelo de fuente de calor interna responsable de la inercia térmica.

Asimismo, se puede apreciar que la pendiente con la cual progresa, tras cada interrupción de ensayo, el incremento de temperatura es el mismo que el obtenido en los ciclos de carga previos. En la Figura 4.28 se presenta un gráfico que refleja esta situación, representando la evolución del módulo de elasticidad aparente y del incremento térmico con respecto de un eje temporal en escala lineal para no distorsionar las pendientes registradas.

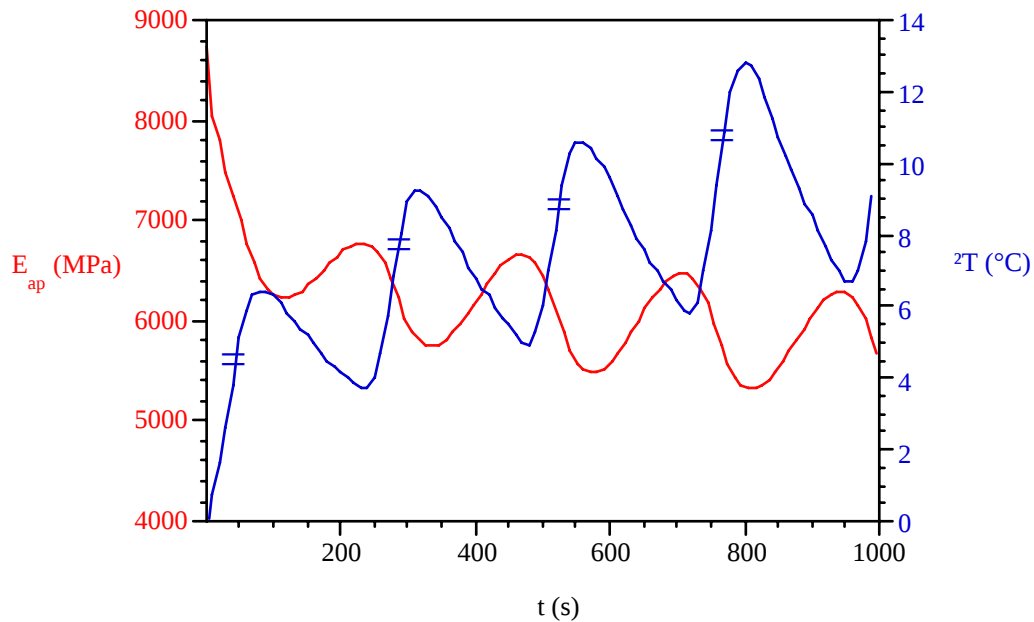


Figura 4.28. Comparación entre gradientes de temperatura para PR35 al 90% con $t_e = 180$ s.

5.2.2 Influencia sobre el comportamiento mecánico

Para establecer la influencia del tiempo de espera en el comportamiento mecánico de los materiales en estudio, se emplea como indicador del mismo el módulo de elasticidad aparente, E_{ap} .

Para un determinado material y nivel tensional, se dispone de tres tipos de representaciones: una para esfuerzos variables continuos y otras dos para tiempos de espera de 30 y 180 s entre bloques de carga, respectivamente. En algunos casos fueron aplicados tiempos de reposo más prolongados.

Comparando estas curvas se puede apreciar cómo el comportamiento del material se encuentra influenciado por estos períodos de descanso durante los cuales su recuperación es posible. En el diagrama de la Figura 4.29, representativo del resto

de los resultados encontrados, se puede apreciar que el aumento de t_e produce un decrecimiento de E_{ap} más lento. Esta situación se hace más acusada cuanto mayor es la variación de tensión aplicada sobre el material.

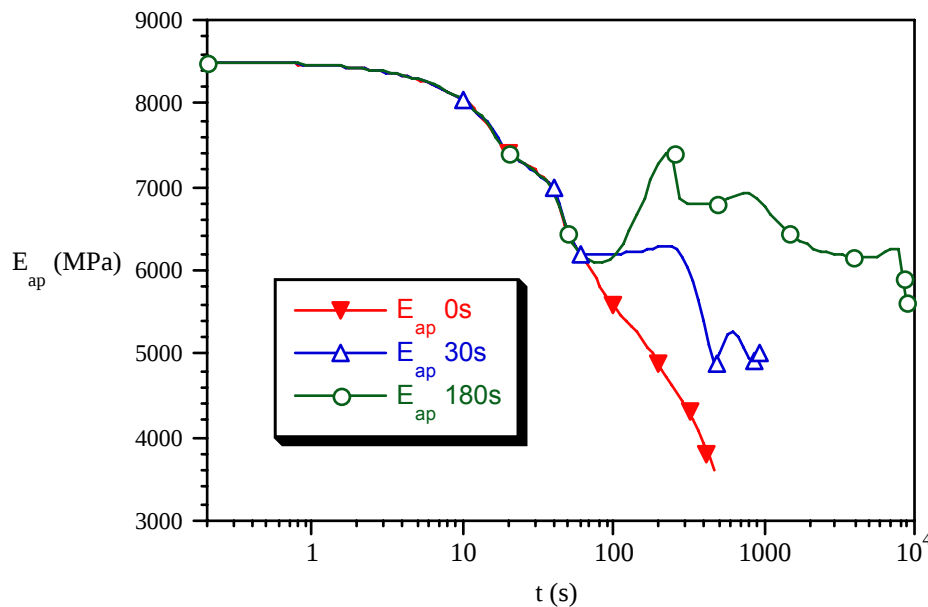


Figura 4.29. Efecto de t_e para PS35 al 50%.

En los gráficos de las Figuras V.25 a V.33 del Anexo V de esta Tesis se representa la evolución del módulo de elasticidad aparente (E_{ap}) con el tiempo de espera aplicado (t_e) para los distintos materiales analizados en este estudio y para un determinado nivel de esfuerzos empleado. Los resultados gráficos correspondientes al material designado por PS25 no se han representado, ya que su comportamiento resultó muy similar al mostrado por el material codificado como PS35.

Asimismo, en los gráficos de las Figuras V.34 a V.42 del Anexo V de esta Tesis se presenta la evolución de E_{ap} en los materiales bajo diferentes estados tensionales y tiempos de espera. En los mismos se aprecia una tendencia semejante a la comentada en el apartado 4.1 para fatiga continua, si bien, en este caso, la aplicación de ciclos de carga interrumpidos por tiempos de espera, prolonga la vida en los materiales.

5.2.3 Cuantificación del efecto del tiempo de espera en el comportamiento de los diferentes materiales

El más notorio efecto de los tiempos de espera, o de descanso, es que permiten al material soportar un mayor número de ciclos de carga fluctuante. Sin embargo, este efecto puede ser diferenciado con respecto a los distintos materiales analizados y al nivel tensional impuesto. Una forma sencilla de cuantificarlo es encontrando el factor multiplicativo que establece el incremento del número de ciclos hasta la rotura. Este parámetro se denominará *ganancia* puesto que expresa el aumento de la vida en fatiga del material. Si se emplea la fatiga continuada como referencia, puede establecerse un factor denominado *ganancia absoluta*, G_a . Los valores de G_a , correspondientes a los distintos casos analizados, son los que se indican en la Tabla 4.12. Estos valores son de carácter indicativo, puesto que son valores experimentales obtenidos del trabajo empírico realizado, quedando sujetos a una cierta distribución. Por lo tanto, puede establecerse una ganancia para cada una de las siguientes situaciones comparativas:

- $t_e = 0$ s (fatiga continua) frente a $t_e = 30$ s
- $t_e = 30$ s frente a $t_e = 180$ s
- $t_e = 180$ s frente a $t_e \geq 300$ s

o bien definirla de forma acumulada con referencia a la fatiga continua.

Tabla 4.12. Valores de G_a para los diversos materiales.

G_a	$t_e = 0s$ hasta $t_e = 30s$	$t_e = 0s$ hasta $t_e = 180s$	$t_e = 0s$ hasta $t_e \geq 300s$
PR35-60%	1.06	2.00	6.00
PR35-50%	2.00	10.00	43.00
R-90%	1.60	2.00	---
R-80%	2.00	3.60	165*
R-70%	∞	---	---
PS35-60%	1.00	1.30	---
PS35-50%	1.25	5.00	---

PS35-40%	1.60	---	---
----------	------	-----	-----

* Valor encontrado para la situación $t_e = 0$ s frente a $t_e = 900$ s.

Se puede apreciar que, para los niveles tensionales más elevados, los procesos mecánicos son predominantes, siendo mínimos los efectos producidos por la variación térmica. Por lo tanto, es lógico, o al menos esperable, que la introducción de los tiempos de espera no varíe, fundamentalmente, esta situación. La ganancia obtenida para estas amplitudes de carga es limitada, lo cual puede ser observado en la Tabla 4.12. Con la aplicación de 30 s de t_e , se han obtenido valores de G_a de 1.00 y 1.06 para PA reforzadas bajo amplitudes del 60% de σ_R . En estas condiciones de carga, incrementos del t_e de 180 s sólo conllevan sensibles mejoras, registrándose factores de 1.30 y 2.00. Sin embargo, 300 s de t_e mejoran sensiblemente el funcionamiento del material PR35.

Reduciendo el nivel de esfuerzos, el efecto de la temperatura debiera incrementarse, haciéndose incluso predominante. En PA, para t_e de 30 s, los factores de ganancia absoluta llegan a alcanzar un valor de 2. El efecto del tiempo de reposo adquiere una relevante importancia con tiempos de descanso de 180 s, obteniéndose factores de 5.00 y 10.00 para PS35 y PR35, respectivamente.

Por otro lado, el material de resina acetálica (R) posee un valor de G_a muy elevado, llegando a incrementar 165 veces su vida en fatiga para tiempos de espera muy prolongados (de hasta 15 minutos, 900 s). Reduciendo aún más los niveles tensionales, es posible obtener un límite de fatiga superior para el material de resina acetálica (R), el cual soporta 1.000.000 de ciclos al solicitarle con esfuerzos máximos del 70% de su resistencia dinámica cuando se introducen tiempos de espera de 30 s, mientras que a estos niveles de esfuerzos la rotura del material sobrevenía cuando se aplicaba fatiga sin interrupciones. Este razonamiento puede ser aplicable al resto de los materiales, pero, sin embargo, no fue contrastado experimentalmente, ya que se emplearon elevados escalones de carga de unos a otros niveles de esfuerzo (10% σ_R).

En consecuencia, se puede concluir que los materiales termoplásticos en estudio sólo obtienen provecho de los tiempos de recuperación a niveles tensionales para los que los efectos térmicos son importantes en el proceso de la fatiga, donde el incremento del número de ciclos hasta la rotura es elevado. Asimismo, los incrementos térmicos pueden alcanzar una estabilización para sollicitaciones de carga más elevadas, obteniéndose mayores límites de fatiga.

Por otro lado, para cuantificar el efecto de los tiempos de espera se puede definir un *factor de tiempo de espera*, τ , como:

$$\tau = \frac{t_e}{t_c} \quad (4.3)$$

siendo:

t_e : tiempo de espera entre bloques de ondas.

t_c : tiempo de actuación de la carga fluctuante entre tiempos de espera.

resultando:

$\tau = 0.0$ para fatiga continua ($t_e = 0$ s)

$\tau = 0.5$ para $t_e = 30$ s

$\tau = 3.0$ para $t_e = 180$ s

$\tau = 5.0$ para $t_e = 300$ s

Representando la ganancia absoluta, G_a , en función del factor del tiempo de espera, τ , para distintos niveles de carga se obtienen los gráficos de las Figuras 4.30 a 4.32, en los cuales se indican las barras de error con una altura del 25% del valor medido para indicar que estos valores están afectados por una cierta incertidumbre debido a la dispersión de los valores experimentales obtenidos. Todas las curvas pasan por el valor $G_a = 1$ para $\tau = 0$.

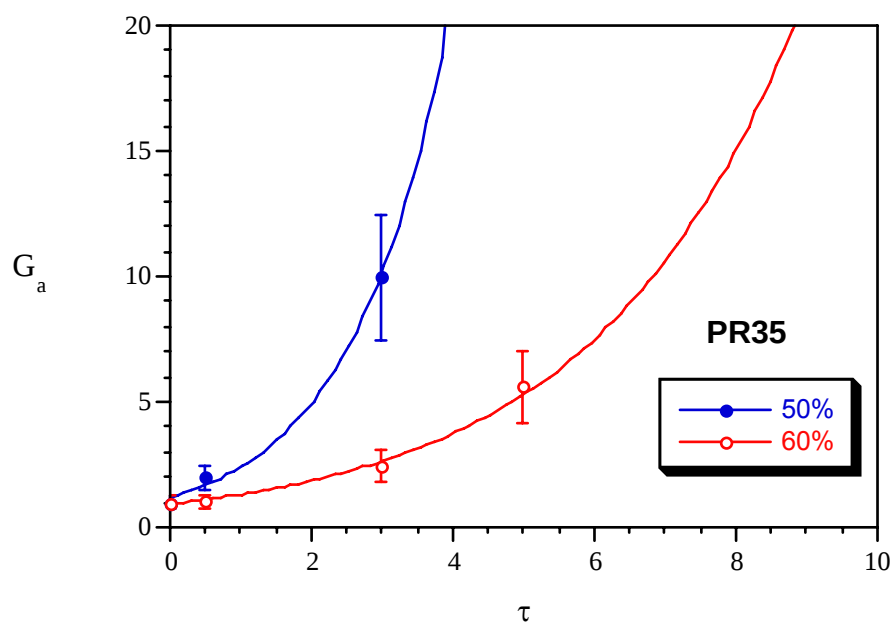


Figura 4.30. $G_a=G_a(\tau)$ para PR35 al 50% y 60%.

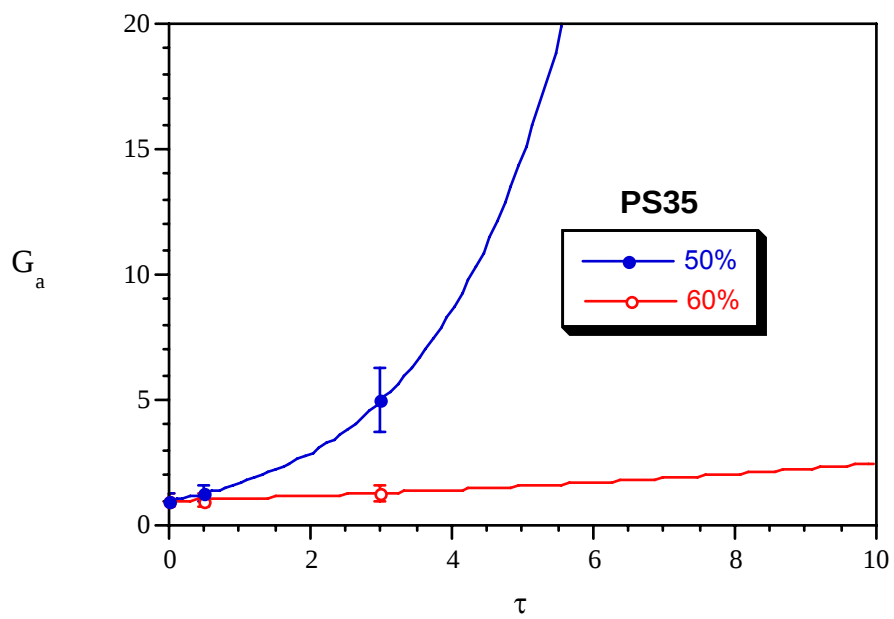


Figura 4.31. $G_a=G_a(\tau)$ para PS35 al 50% y 60%.

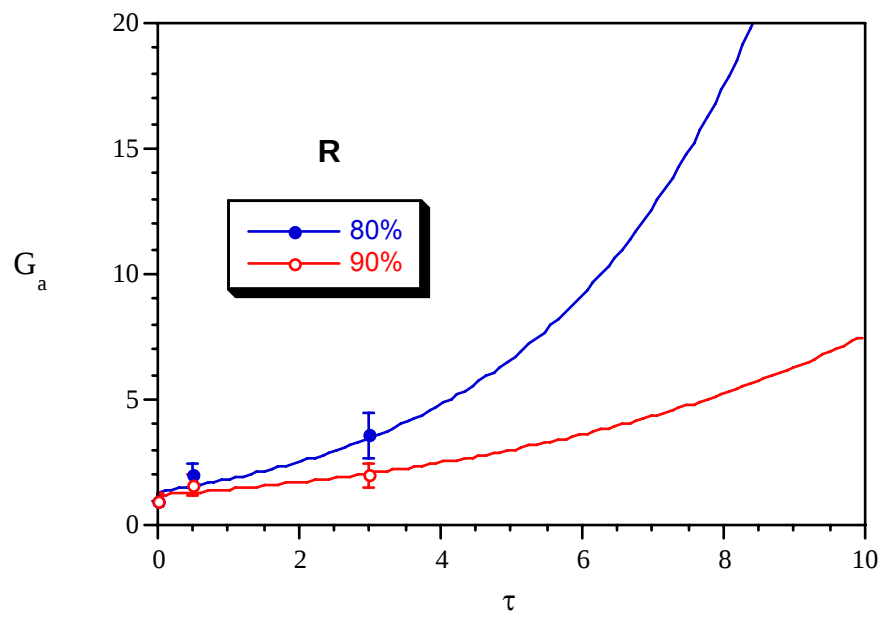


Figura 4.32. $G_a=G_a(\tau)$ para R al 80% y 90%.

En todos los casos, la ganancia absoluta, G_a , aumenta con el incremento del factor del tiempo de espera, τ . Este efecto es más importante para el valor de tensiones para los que los materiales se muestran sensibles a los efectos térmicos en su comportamiento en fatiga. Por lo tanto, se puede apreciar que la introducción de los tiempos de espera tiene mayor efecto en la resina acetálica (R) para elevados niveles de carga, ya que este material presenta una elevada sensibilidad a los efectos térmicos.

En la Figura 4.33 se presenta el incremento del límite de fatiga, $\Delta\sigma_6$, experimentado por los cuatro materiales en estudio, en función de la aplicación de los distintos tiempos de espera, representados a partir del valor de τ .

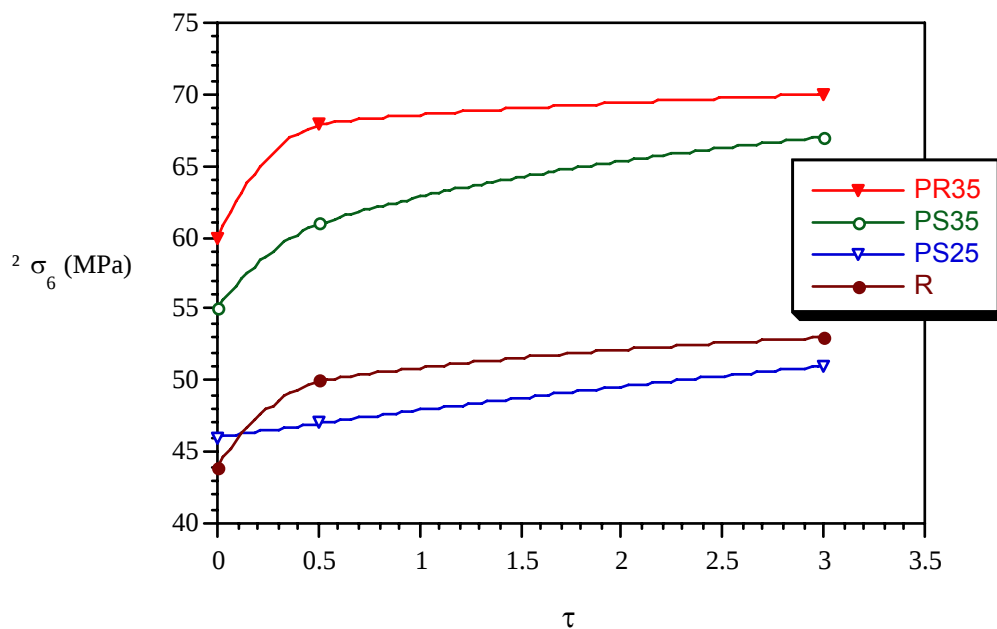


Figura 4.33. $\Delta\sigma_6 = \Delta\sigma_6(\tau)$ para los materiales estudiados.

Finalmente, como resumen, en los gráficos de las Figuras 4.34 a 4.36 se presentan las curvas de Wöhler de los cuatro materiales analizados para cada uno de los tiempos de espera considerados.

De nuevo, se mantienen las consideraciones realizadas en el apartado 4.3 de este capítulo, en cuanto a la mayor capacidad resistente a la fatiga de las PA reforzadas frente a la resina acetálica, en general, siendo el material PR35, en particular, el que presenta un mayor límite de endurencia bajo todos los niveles tensionales y tiempos de espera contemplados en este estudio.

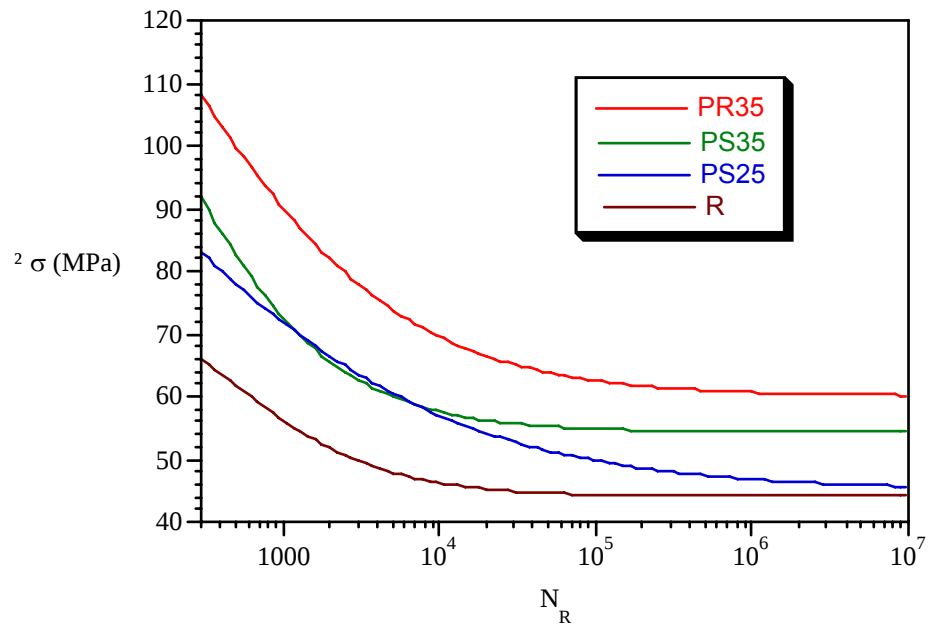


Figura 4.34. Curvas de Wöhler para los materiales analizados con $t_e = 0$ s.

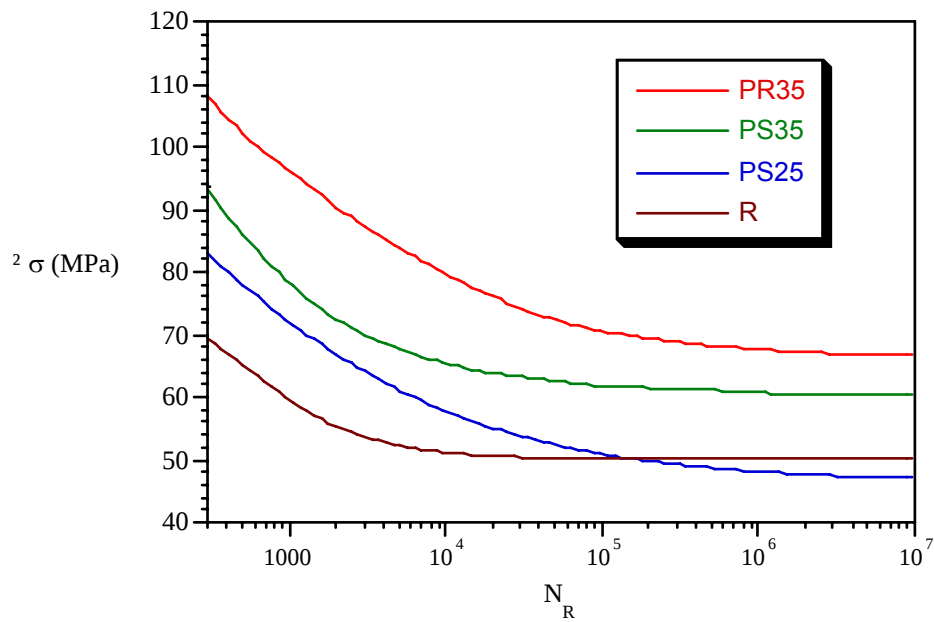


Figura 4.35. Curvas de Wöhler para los materiales analizados con $t_e = 30$ s.

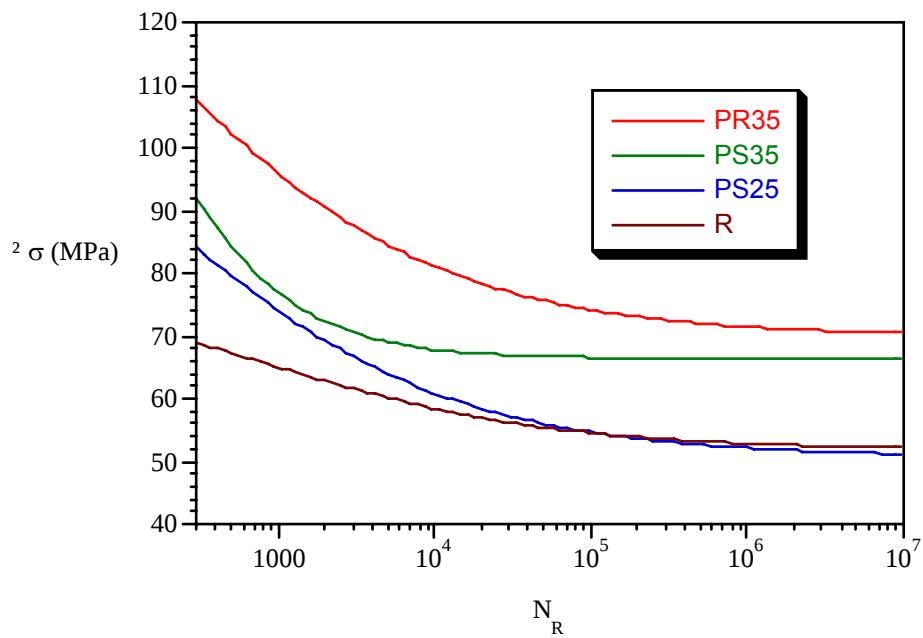


Figura 4.36. Curvas de Wöhler para los materiales analizados con $t_e = 180$ s.

6 CONSIDERACIONES GENERALES

Tras el trabajo desarrollado en este capítulo y estableciendo como criterio de selección de material su resistencia ante fenómenos dinámicos de fatiga, se puede considerar la poliamida reforzada con la cantidad máxima de fibra de vidrio ensayada (PR35) como el más idóneo para las aplicaciones que justifican esta Tesis.

No obstante, es necesario analizar las condiciones críticas alcanzadas durante el proceso de la fisuración por fatiga de esta familia de materiales, a escala local, conducente a su rotura. De esta forma, sería posible modelizar su comportamiento y acotar las limitaciones que restringen su empleo. La correspondiente modelización serviría, en el proceso de selección, como una herramienta de mayor precisión que la mera caracterización y comparación de los resultados obtenidos. Con este propósito se desarrolla el siguiente capítulo.